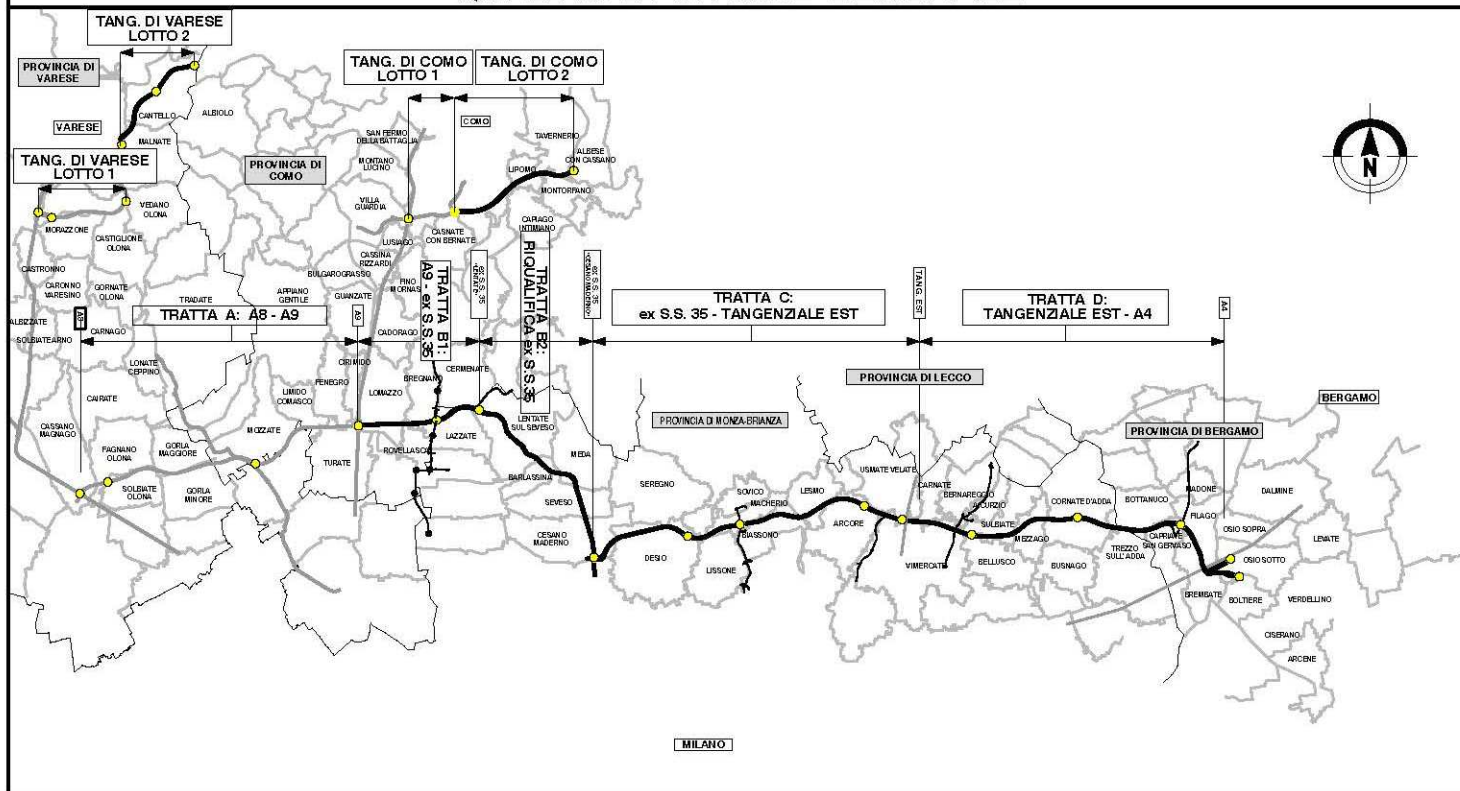


# QUADRO DI UNIONE GENERALE



## COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE

DALMINE-COMO-VARESE-VALICO DEL GAGGIOLO E OPERE AD ESSO CONNESSE

CODICE C.U.P. F11B06000270007

## PROGETTO ESECUTIVO TRATTA B2

STUDIO ACUSTICO E VIBRAZIONALE  
RELAZIONE TECNICA VIBRAZIONI  
STUDIO VIBRAZIONI – RELAZIONE SPECIALISTICA COMPONENTE VIBRAZIONI

### IDENTIFICAZIONE ELABORATO

FASE PROGETTUALE	AMBITO	TRATTA	CATEGORIA	OPERA	PARTE DI OPERA	TIPO ELABORATO	PROGRESSIVA	REVISIONE ESTERNA
E	AC	B2	000	GE0	000	RS	002	A

DATA Giugno 2023  
SCALA ---

### CONCEDENTE



### CONTRAENTE GENERALE

PEDELOMBARDA NUOVA S.c.p.A.

#### DATA

DATA	REVISIONE	
06 Aprile 2023	Bozza	A01
Giugno 2023	Emissione per commenti	A02

#### ELABORAZIONE PROGETTUALE

PROGETTISTI	RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE
Proger S.p.A.	Ing. Carlo Listorti
PROGER	
Redatto: R. Abate	Verificato: M. Larosa
	Approvato: M. Sandrucci

### CONCESSIONARIO



### PROGETTISTA





COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE  
DALMINE – COMO – VARESE – VALICO DEL GAGGIOLO  
E OPERE CONNESSE

## **PROGETTO ESECUTIVO**

TRATTE B2, C, TRMI10/TRMI17/TRCO06

### **TRATTA B2**

**STUDIO ACUSTICO E VIBRAZIONALE**  
RELAZIONE TECNICA VIBRAZIONI  
STUDIO VIBRAZIONI – RELAZIONE  
SPECIALISTICA - COMPONENTE VIBRAZIONI

## SOMMARIO

1.	IMPOSTAZIONE GENERALE STUDIO .....	5
2.	PREMESSA.....	6
3.	RIFERIMENTI NORMATIVI .....	7
3.1.	ISO 2631 “Valutazione sull’esposizione del corpo umano alle vibrazioni” .....	8
3.2.	UNI 9614 “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo” .....	8
3.3.	UNI 9916 “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici” .....	16
4.	INQUADRAMENTO TERRITORIALE ED AMBIENTALE .....	19
4.1.	Contesto geologico e geomorfologico .....	19
4.2.	Caratterizzazione geotecnica del tracciato .....	23
5.	CARATTERIZZAZIONE ANTE OPERAM .....	26
5.1.	Censimento dei Ricettori .....	26
6.	GLI IMPATTI CON LA REALIZZAZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO .....	28
6.1.	La propagazione delle onde vibrazionali .....	28
6.1.1.	Attenuazione geometrica .....	30
6.1.2.	Velocità di transito .....	30
6.1.3.	Caratterizzazione della sorgente.....	31
6.1.4.	Propagazione delle onde nei terreni.....	31
6.1.5.	Propagazione delle onde nelle strutture edilizie .....	32
6.1.6.	Incertezza del modello .....	36
6.1.7.	Rumore trasmesso per via solida dalle strutture .....	37
6.2.	Indagini vibrometriche, taratura e validazione del modello .....	38
6.2.1.	Caratterizzazione emissione sorgente stradale a raso ed in rilevato per la viabilità di grande comunicazione.....	38
6.2.2.	Caratterizzazione emissione sorgente stradale in galleria artificiale per la viabilità di grande comunicazione.....	45
6.2.3.	Caratterizzazione emissione sorgente stradale a raso ed in rilevato per la viabilità locale	52
6.3.	Modello di esercizio di progetto.....	59
6.4.	Funzione di propagazione delle vibrazioni in stato di progetto .....	64
6.4.1.	Funzione di propagazione sezione a raso ed in rilevato (Sc.B1 2500-2000) .....	64
6.4.2.	Funzione di propagazione sezione a raso ed in rilevato (Sc.B2 1000-500) .....	66
6.4.3.	Funzione di propagazione sezione in galleria e in trincea (Sc.B1 2500-2000).....	68
6.4.4.	Funzione di propagazione sezione in galleria e in trincea (Sc.B2 1000-500).....	70
6.4.5.	Funzione di propagazione sezione a raso per la viabilità locale (Sc.BL1 600-250) ..	72
6.4.6.	Funzione di propagazione sezione a raso per la viabilità locale (Sc.BL2 <250) .....	74
7.	PREVISIONE DELL’IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO .....	76
7.1.	Valutazione delle vibrazioni ai ricettori .....	76

7.2.	Tecniche di mitigazione delle vibrazioni .....	78
7.2.1.	Mitigazioni delle vibrazioni in fase di esercizio .....	78
8.	CANTIERIZZAZIONE .....	80
8.1.	Metodologia di analisi .....	80
8.2.	Valutazione di impatto delle vibrazioni prodotte dal cantiere .....	80
8.2.1.	Quadro tecnico e normativo .....	82
8.2.2.	Definizione del disturbo vibrazionale .....	83
8.2.3.	Metodologia per la valutazione dei livelli vibrazionali di cantiere .....	83
8.2.4.	Modello di calcolo .....	85
8.2.5.	Definizione e previsione degli scenari .....	88
8.2.6.	Valutazione delle vibrazioni ai ricettori .....	97
8.2.7.	Conclusioni allo studio previsionale delle vibrazioni in fase di cantiere .....	97
8.2.8.	Mitigazioni delle vibrazioni .....	98
8.2.9.	Il rapporto opera – ambiente e le misure di prevenzione e mitigazione adottate durante la fase di cantiere .....	99
9.	CONCLUSIONI .....	100

## 1. IMPOSTAZIONE GENERALE STUDIO

Lo studio vibrazionale è articolato:

- Relazione tecnica vibrazionale;
- Rapporto di misura per i rilievi delle vibrazioni.

Il presente studio della matrice vibrazioni si pone lo scopo di compiere la valutazione sulle vibrazioni stimate ai ricettori prossimi al nuovo tracciato stradale in riferimento ai limiti della normativa UNI 9614:2017.

Il presente studio è stato eseguito dal Ing. Tiziano Baruzzo, tecnico competente in acustica iscritto all'Elenco Nazionale (ENTECA, n.2483).

## 2. PREMESSA

Lo Studio Vibrazionale, relativo al progetto definitivo della **tratta B2** della nuova Pedemontana Lombarda e delle opere connesse è stato sviluppato, in accordo con quanto predisposto dalla Delibera di Giunta Regionale n° VII/8313 dell'8 Marzo 2002. **Lo studio ha recepito inoltre le prescrizioni e raccomandazioni CIPE al progetto definitivo.**

In particolare, lo studio illustra:

1. L'inquadramento del territorio interferito dalla realizzazione dell'opera e lo stato attuale dell'ambiente;
2. La descrizione dei dati progettuali di base, e delle fonti disponibili, in particolare:
  - a. Lo studio di Impatto Ambientale;
  - b. Il censimento dei recettori sensibili e l'individuazione dei punti di rilievo vibrometrico
  - c. Lo Studio di traffico (forniti dalla committenza);
3. Le modifiche introdotte dall'opera;
4. La compatibilità dell'opera con gli standard esistenti;
5. Le eventuali opere di mitigazione necessarie.
6. La fase di cantierizzazione.

Per la valutazione delle vibrazioni ai ricettori si farà riferimento al censimento dei ricettori acustici. Il censimento dei ricettori acustici ha riguardato la fascia di pertinenza della nuova infrastruttura (250m per lato) ed è stato inoltre esteso alla fascia immediatamente esterna (tra 250m e 300m) ai fini della verifica del rispetto dei limiti del PCCA per i ricettori ubicati in prossimità della fascia di pertinenza stradale. Per quanto riguarda il censimento dei ricettori sensibili la ricerca è stata estesa ad una fascia pari al doppio della precedente in linea con le disposizioni del D.P.R. 30/03/04, n°142.

La metodologia adottata per la valutazione delle vibrazioni a seguito della realizzazione dell'opera di progetto è risultata nella creazione di un modello, tarato sui risultati di un'adeguata campagna di misure vibrometriche in situ, che permettesse la predizione della distanza limite dal tracciato del rispetto dei limiti delle vibrazioni previsti dalla UNI 9614:2017.

Per quanto riguarda il dettaglio dell'individuazione dei punti di rilievo vibrometrico si rimanda al report di misura delle vibrazioni (Elab. EACB2000GE00000RS004a)

Per verificare la compatibilità del progetto con gli standard, lo studio ha tenuto conto delle norme relative alle vibrazioni, in particolare della UNI 9614:2017.

Lo studio delle vibrazioni è stato articolato secondo le tratte autostradali in progetto per ognuna delle quali sono stati prodotti specifiche elaborazioni in funzione della tipologia di opera civile.

La tratta stradale considerata è riportata nella tabella seguente, nella quale si richiamo anche le opere connesse principali. Lo studio si è infatti esteso anche alla restante viabilità locale.

TRATTA	OPERE CONNESSE
TRATTA B2	
	Interconnessione con SS35
	TRCO 06

Tab. 2.1 - Tratte stradali

### 3. RIFERIMENTI NORMATIVI

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.

La caratterizzazione delle emissioni di vibrazioni da parte di veicoli non è soggetta alle stringenti normative e disposizioni legislative che normano invece l'emissione del rumore e sebbene le vibrazioni trasmesse agli edifici non siano state argomento di legiferazione da parte dello Stato italiano è tuttavia universalmente riconosciuta la competenza in materia da parte dell'UNI, ente preposto alla redazione della normativa tecnica in ambito nazionale.

L'UNI ha pubblicato negli anni una completa serie di norme (nazionali e/o recepimenti di norme internazionali) che coprono l'intera problematica delle vibrazioni negli edifici: la valutazione del disturbo alle persone, la valutazione del danno strutturale, l'implementazione della metodologia di misura ecc.

In particolare, le norme di interesse per il presente studio di impatto sono:

- Norma **UNI 9614:1990** "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo";
- Norma **UNI 9614:2017** "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo";
- Norma **UNI 9916:2004** "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici".

Nella UNI 9614:1990 è definito il metodo di misura delle vibrazioni di livello costante immesse negli edifici ad opera di sorgenti esterne o interne agli edifici stessi. La norma concorda parzialmente con la norma internazionale ISO 2631/2. La UNI 9614:1990 ha subito una revisione nel 2017. La UNI 9614:2017 imposta un approccio profondamente diverso nella modalità di valutazione dei disturbi da vibrazione. Per tale motivo, considerando il nuovo approccio proposto dalla revisione del 2017 la valutazione del modello di propagazione sarà eseguita in riferimento alla UNI 9614:2017.

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 per permettere la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica.

Vi sono, inoltre, norme internazionali di riferimento, fra cui:

- ISO 8041 Human response to vibration – Measuring instrumentation
- ISO 2631-1, Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General requirements, 1997;
- ISO 2631-2, Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz), 1989;
- ISO 5347, Metodi per la calibrazione dei rilevatori di vibrazioni;
- ISO 5348, Montaggio meccanico degli accelerometri;
- ISO 1683, Acoustics – Preferred reference quantities for acoustic levels, 1983;

- DIN 4150, Vibrations in building. Part 1: Principles, predetermination and measurement of the amplitude of oscillations, 1975.
- DIN 4150-2, Vibrations in building. Part 2: Influence on persons in buildings, 1975.
- DIN 4150-3, Vibrations in building. Part 3: Influence on constructions, 1975.

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”.

Di seguito si fornisce una breve sintesi dei contenuti essenziali delle norme più rilevanti utilizzate per la valutazione dell’impatto da 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:



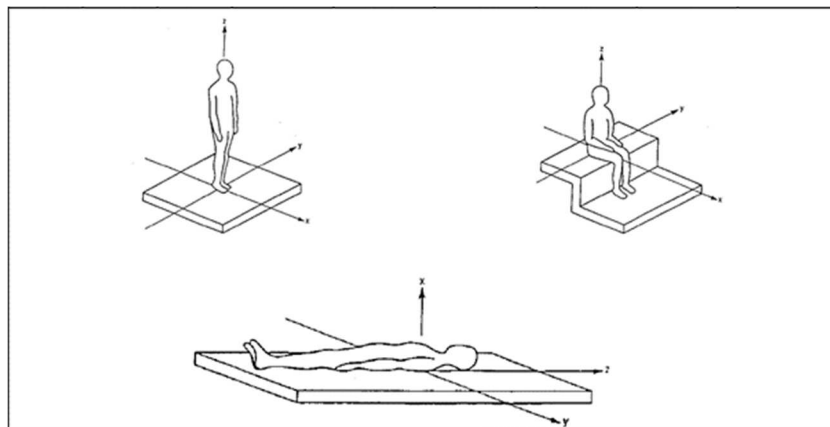
$$a = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a(t)^2 dt}$$

o del suo equivalente livello di accelerazione (espressione in dB dell'accelerazione espressa in m/s<sup>2</sup>):

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

Nella definizione di accelerazione ponderata *a<sub>w</sub>* 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 $L_{\text{eff}}$ [dB] (*)			Accelerazione $A_{\text{eff}}$ [ $\text{mm/s}^2$ ]			Velocità $V_{\text{eff}}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]		
		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  $\mu\text{m/s}^2$  ( $10^{-6}$  m/s<sup>2</sup>)

(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 $L_{\text{aw}}$ (dB)	Limite di accettabilità per abitazioni $L_{\text{aw}}$ (dB)	Limite di accettabilità per uffici $L_{\text{aw}}$ (dB)
Asse Z	74	77	86
Assi X-Y	71	74	83

In riferimento alla UNI 9614:2017, essendo essa presa a riferimento nello studio, si riporta di seguito la descrizione dettagliata della norma.

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.

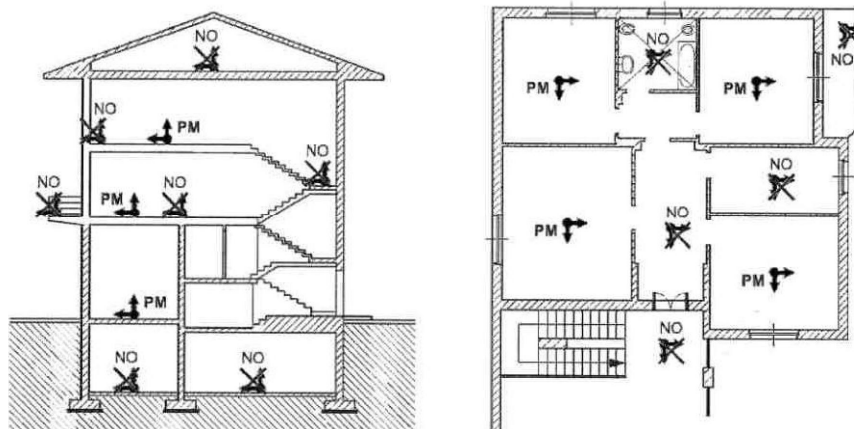


Figura 3-1 Individuazione corretta e non corretta dei punti di misura

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

Il montaggio degli accelerometri deve essere tale da garantire la trasmissione rigida del moto dal sistema vibrante all'accelerometro almeno della banda 0-500 Hz e deve essere eseguito facendo riferimento alla norma UNI ISO 5348 o secondo le indicazioni fornite dal produttore del sensore. Le modalità di installazione devono essere riportate nel rapporto di misura e devono essere scelte in relazione alle condizioni dei piani di posa, prevedendo eventualmente l'utilizzo, anche contemporaneo, di inserti/tasselli (meccanici o chimici) inseriti nel piano di posa, collaggi rigidi (mastici, resine, cera d'api), magneti, collegamenti bullonati o masse appoggiate isostaticamente sulle superfici alle quali è vincolato l'accelerometro (configurazione non concessa per superfici morbide o irregolari). Il corretto funzionamento della catena di misura deve essere verificato prima e dopo ogni misura mediante apposito calibratore a norma UNI EN ISO 8041-1; sono ammessi calibratori a frequenza fissa pari a 1000 rad/s ed ampiezza di  $10\text{m/s}^2$ . Ogni tre anni l'intera catena di misura deve essere sottoposta a verifica di taratura.

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

Per l'elaborazione delle misure ed il calcolo dei parametri del disturbo, la norma UNI 9614:2017 suggerisce un metodo sequenziale valido per tutti i tipi di sorgente 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.

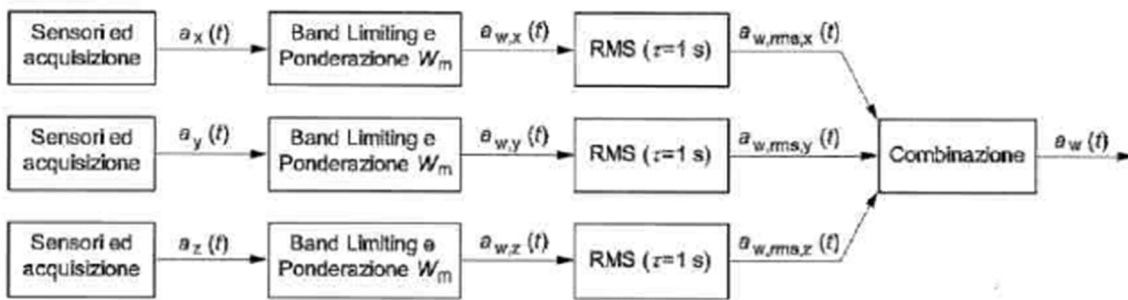


Figura 3-2 Schema di calcolo dell'accelerazione ponderata efficace secondo la UNI 9614:2017

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

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

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

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

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

dove:

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

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

s 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/s<sup>2</sup>
- periodo notturno: 3.6 mm/s<sup>2</sup>
- periodo diurno di giornate festive: 5.4 mm/s<sup>2</sup>

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

- ambienti di lavoro (1)  $V_{sor} = 14 \text{ mm/s}^2$
- ospedali, case di cura ed affini (2)  $V_{sor} = 2 \text{ mm/s}^2$
- asili e case di riposo (3)  $V_{sor} = 3.6 \text{ mm/s}^2$
- scuole (4)  $V_{sor} = 5.4 \text{ mm/s}^2$

Note:

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

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

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

Destinazione d'uso	Accelerazione Vettore $V_{sorg} \text{ (m/s}^2\text{)}$
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)	$5,4 \cdot 10^{-3}$

Tab. 3.1 - 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:

- sull'edificio (nel suo complesso)
- 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÷50 mm/s, e per vibrazioni continue, con velocità 2÷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÷100 mm/s oppure per vibrazioni continue associate a velocità di 3÷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÷200 mm/s oppure per vibrazioni continue associate a velocità di 5÷20 mm/s.

In considerazione dei valori nettamente inferiori dei limiti previsti della norma UNI 9614:2017 rispetto a quelli della norma UNI 9614:2014, si considera nella presente valutazione, che il rispetto dei limiti della norma UNI 9614:2017 implichi il conseguente rispetto anche dei limiti della norma UNI 9916:2014.

## 4. INQUADRAMENTO TERRITORIALE ED AMBIENTALE

Con riferimento ai limiti amministrativi vengono interessati i seguenti territori comunali:

- Lentate sul Seveso.
- Barlassina
- Meda
- Seveso

In accordo a quanto previsto dal documento di indirizzi e dalla delibera regionale di approvazione del progetto pubblicato in data 04/02/2004, sulla tratta Barlassina – Cesano Maderno oltre all'intervento di autostradalizzazione della Milano-Meda è stata prevista anche la realizzazione di una nuova viabilità a carattere locale atta a garantire gli spostamenti a breve raggio. Questo nuovo asse (piattaforma 10.50m – tipo C1) si sviluppa pressoché parallelamente all'asse Pedemontana rimanendovi affiancato nei tratti in rilevato e in trincea o sovrapponendosi nei tratti in galleria artificiale. Su questa arteria confluiscono per mezzo di rotatorie o di innesti a T, tutte le viabilità trasversali attualmente esistenti. Si viene così a creare un collegamento Barlassina-Cesano che non si propone come alternativa all'asse autostradale data la tortuosità del tracciato e la elevata presenza di intersezioni a raso, ma che garantisce un efficace collegamento per gli spostamenti a breve raggio. L'interramento della S.S. n.35 nel tratto Meda-Cesano comporta la necessità di chiudere gli svincoli intermedi attualmente esistenti. Tali svincoli vengono riproposti sulla viabilità di arroccamento. Lo svincolo di Meda, cui il nuovo asse Barlassina – Cesano, per mezzo dello svincolo esistente riqualificato, si collega, diviene quindi l'unico punto di ingresso/uscita per la viabilità locale sul sistema Pedemontana.

L'eliminazione della galleria naturale Barlassina, prevista dal progetto preliminare, a favore di una soluzione meno impattante quale la trincea, ha richiesto l'introduzione di una viabilità secondaria tra i Comuni di Barlassina e Lentate sul Seveso. Tale opera, fortemente voluta dai Comuni interessati, andrà a realizzare un raccordo di tipo tangenziale (cat. C secondo il DM 2001) esterno all'abitato.

### 4.1. Contesto geologico e geomorfologico

L'area oggetto del presente studio si colloca nell'alta Pianura Padana centrosettentrionale, compresa grosso modo tra il Fiume Olona ad ovest e il Fiume Adda ad est.

L'area di pertinenza del tracciato risulta impostata su depositi in giacitura sub-orizzontale con spessori di migliaia di metri, di età pliocenico-quadernaria e di ambiente marino e continentale.

Tali materiali, disposti prevalentemente con giacitura monoclinale verso le Alpi si sono adeguati inferiormente alle superfici morfologiche formatesi nel periodo precedente alla trasgressione pliocenica: le indagini, effettuate in svariati decenni nell'area, solo raramente sono riuscite ad attraversare la spessa coltre pliocenica.

I sedimenti pliocenici ricoprono in discordanza formazioni conglomeratico-arenacee mioceniche ed un substrato marino, piegato e fagliato (faglie listriche), costituito da rocce carbonatiche e terrigene mesozoiche facente parte, da un punto di vista strutturale, della catena sudalpina cioè quel settore alpino che si sviluppa a sud della Linea Insubrica (o Linimento Periadriatico).

Questa porzione di catena è stata soggetta ad una serie di eventi di *back-thrusting* con formazione di sovrascorrimenti sud vergenti e pieghe associate che la differenziano dall'edificio strutturale alpino principale a nord della Linea Insubrica, caratterizzato invece da unità tettoniche nord vergenti.

La struttura a *thrust* e pieghe, legata ad un sistema di ricoprimento tipo “imbricate fan” e successivamente fagliata, può essere interpretata come il risultato dell’interferenza della più recente tettonica appenninica con l’assetto strutturale della Pianura Lombarda “foreland” del ricoprimento alpino, già piegato quando la recente tettonica appenninica lo aveva coinvolto.

In altre parole, la sequenza pre-pliocenica, sempre caratterizzata da strutture con polarità sudalpina, potrebbe aver reagito alla susseguente compressione appenninica prima innalzando le strutture preesistenti e quindi piegando con esse anche la sequenza pliocenica.

La zona, come quasi tutto il territorio padano, è stata investigata tramite perforazioni petrolifere e tecniche esplorative superficiali (sismica a riflessione). La massima profondità raggiunta da queste indagini ha consentito di investigare le serie del Paleocene e dell’Eocene, consentendo quindi di evidenziare la presenza della “Scaglia Rossa” (che testimonia un regime di deposizione pelagico).

Durante il Miocene, l’area ha continuato ad essere un ambiente deposizionale di tipo marino, interessato da apporti prevalentemente terrigeni grossolani. I termini miocenici possono raggiungere, nella Pianura Padana, complessivamente anche i 3.000 m; a sud di Milano tali depositi sono rappresentati solo da materiali ascrivibili al Miocene inferiore sui quali giacciono, trasgressivi, i sedimenti grossolani pliocenici.

La Pianura Padana durante il Pliocene era un ambiente deposizionale prevalentemente di tipo marino; si trattava di un ampio braccio di mare che partendo dal margine meridionale delle Alpi occupava completamente l’attuale pianura e buona parte delle aree ove attualmente si rilevano le propaggini settentrionali dell’Appennino.

I depositi pliocenici, costituiti perlopiù da sabbie e ghiaie alle quali si associano lateralmente depositi argillosi, sono stati più volte sollevati durante il Pleistocene inferiore. Sempre durante il Pleistocene, alle fasi di innalzamento subite dal substrato è seguita una fase di consistente subsidenza che portò le alluvioni pleistoceniche ad eliminare completamente la complessa struttura del sottosuolo padano.

Nel Quaternario padano si possono distinguere due serie stratigrafiche: una più superficiale, continentale, e una più profonda, marina; la prima si caratterizza per l’intensa fase erosiva e per i consistenti depositi terrigeni alluvionali (fase post-glaciale, Olocenica), la seconda per l’inizio della fase regressiva subita dal “Mare Padano” e per la sedimentazione dei depositi fluvio-lacustri, deltizi e di pianure costiere su parte della pianura (Pleistocene inferiore). Alle due serie stratigrafiche, come limite di demarcazione delle suddette successioni, deve essere aggiunta una terza serie che più marcatamente ha interessato il territorio d’interesse, nel Pleistocene: la serie delle successioni principali glaciali, note in letteratura con i nomi di Biber, Donau, Gunz, Mindel, Riss e Würm.

Con il Quaternario la subsidenza inizialmente si accentua: il dominio marino si estende maggiormente andando ad interessare i margini di bacino padano non ancora interessati dalla sedimentazione; successivamente si sviluppa un’evoluzione importante del fenomeno in atto (infossamento differenziato del substrato), che porta il bacino padano ad assumere una morfologia caratterizzata da alti e bassi strutturali.

Le litofacies presenti nei depositi quaternari risultano estremamente mutevoli, con frequenti fenomeni di eteropia e discordanza: si può dunque osservare che i litotipi predominanti sono rappresentati da ghiaie, sabbie e limi.

La geologia della zona interessata dall’opera autostradale in progetto è quindi caratterizzata dalla presenza di un’estesa piana connessa agli scaricatori fluvio glaciali quaternari e più recentemente ai corsi d’acqua attuali.

Nella zona difficilmente si riescono a ricostruire gli aspetti morfologici originali e, di conseguenza, non è sempre agevole determinare modalità e gerarchie che hanno contribuito a modellare il

territorio. Gli elementi morfodinamici, di primaria importanza, che rimangono attivi sono rappresentati dalle aste fluviali dei vari corsi d'acqua che caratterizzano l'area.

Coerentemente con la corrente interpretazione dei depositi quaternari, introdotta dal North American Stratigraphic Code (N.A.S.C.), i terreni investigati sono stati distinti secondo la classificazione Allostratigrafica.

L'area entro cui si sviluppa l'Autostrada Pedemontana Lombarda, nello specifico la tratta B2, è stata suddivisa in tre bacini: Verbano, Lario e Brembo. Corrispondentemente per ogni bacino sono state individuate le varie Unità/Alloformazioni di interesse, evidenziandone le caratteristiche principali.

#### **Unità del Bacino di Verbano** a cui sottendono:

- *Allogruppo di Venegono (Ve)*

Costituito da depositi di versante, limo argilloso con clasti alterati sparsi. Superfici limite costituite da superfici di erosione. Caratteristiche litotecniche da scadenti a scarse. Permeabilità, di tipo primario, bassa.

- *Allogruppo di Besnate (Be)*

Costituito da ghiaie e sabbie stratificate e gradate. Presentano un profilo di alterazione poco evoluto (2,5-5 m di spessore); alterazione, in genere, limitata al 30% dei clasti, localmente fino al 70%: ciottoli carbonatici alterati, clasti granitoidi e scistososi parzialmente alterati, gneissici con patina di ossidazione, quarziticci non alterati. Caratteristiche litotecniche discrete in relazione alla granulometria e all'alterazione. Permeabilità, di tipo primario, media-elevata. Costituito da ghiaie e sabbie stratificate e gradate, con profilo di alterazione poco evoluto, 5 m di spessore, ed alterazione limitata al 30% dei clasti, solo localmente fino al 70%.

- *Alloformazione di Cantù (Ca)*

Costituita da ghiaie medie e grossolane stratificate matrice-sostenute (matrice sabbiosa) e da alternanze lentiformi di sabbie, sabbie e limi, sabbie con ciottoli. Superficie limite superiore caratterizzata da morfologia ben conservata, copertura loessica assente, profilo di alterazione poco evoluto con profondità massima di circa 2 metri. Cementazione solo locale. Caratteristiche litotecniche da discrete a buone in relazione alla granulometria, all'alterazione e alla cementazione. Permeabilità, di tipo primario, da media a elevata.

#### **Unità del Bacino del Lario** a cui sottendono:

- *Alloformazione di Binago (Bi)*

Ghiaia a supporto di matrice, poligenica o a dominanza di litologie locali. Superficie limite superiore caratterizzata da un profilo di alterazione evoluto, di spessore non valutabile.

Copertura loessica a fragipan sempre presente. Caratteristiche litotecniche generalmente discrete-buone. Dove l'alterazione e l'argillificazione prevalgono le caratteristiche possono risultare decisamente più scadenti. Permeabilità, di tipo primario, da media a elevata.

- *Allogruppo del Bozzente (Bo)*

Depositi fluviali e fluvioglaciali. Ghiaie massive o poco stratificate con decarbonatazione, argillificazione e arenizzazione dei clasti ad eccezione dei ciottoli quarzosi. Presenza di patine e screziature Fe-Mn. Copertura loessica complessa sempre presente.

Caratteristiche litotecniche generalmente discrete. Dove l'alterazione e l'argillificazione prevalgono le caratteristiche possono risultare decisamente più scadenti Permeabilità, di tipo primario, media.

- *Conglomerati di incerta attribuzione (CI)*

Trattasi di unità conglomeratiche di incerta attribuzione, le cui caratteristiche sono affini alle contigue unità del tipo Ceppo e fra esse va comunque considerata. Caratteristiche litotecniche generalmente buone. Localmente le caratteristiche litotecniche possono risultare più scadenti in corrispondenza di zone fratturate e/o alterate. Permeabilità di tipo primario bassa, di tipo secondario da media a localmente elevata.

**Unità del Bacino del Brembo** a cui sottendono:

- *Unità post-glaciale (Pg)*

Costituita da ghiaie a supporto di matrice, non alterate, con sabbia grossolana, clasto-sostenuta e matrice abbondante. Il deposito si presenta, generalmente, da sciolto a poco addensato con caratteristiche litotecniche da medie a discrete in funzione della granulometria e dell'addensamento. Permeabilità, di tipo primario, elevata.

Nel primo tratto, proseguendo da Nord-Ovest a Sud-Est, le profondità indagate sono interessate da depositi appartenenti all'Allogruppo di Binago e all'Allogruppo di Bozzente.

A partire indicativamente dalla progressiva 1+000 m, l'unità prevalente diviene invece l'Allogruppo di Besnate, che si spinge fino a profondità di circa 25 m.

Al di sotto di tale spessore superficiale, i depositi sono stati classificati come appartenenti ad un conglomerato di incerta attribuzione: si è riscontrata infatti una tendenza, fortemente variabile nella zona, alla cementazione per profondità superiori ai 15-20 m.

Nel tratto compreso approssimativamente tra le progressive 4+200 m e 6+600 m, zona a cavallo tra il Fiume Seveso ed il Torrente Certesa, all'Allogruppo di Besnate si sostituiscono depositi riconducibili all'Unità postglaciale, fino a profondità dell'ordine dei 25-30 m, e all'Alloformazione di Cantù, per profondità maggiori.

Nel tratto rimanente, che si sviluppa da Nord verso Sud, l'Allogruppo di Besnate diviene nuovamente quello predominante su tutte le profondità investigate. Solo localmente, fino approssimativamente alla progressiva 7+000 m, a profondità superiori ai 15 m si presentano materiali con grado di cementazione variabile, solitamente debole ma anche fino a medio.

In merito alla geomorfologia, la tratta B2 non presenta elementi geomorfologici di rilievo. Lungo il tracciato, collocato per gran parte in settori subpianeggianti, non si rilevano aree da poter considerare potenzialmente soggette ad instabilità dei versanti.

Sono presenti orli di terrazzi più marcati solo nella tratta iniziale, in uscita da Lentate scendendo verso la valle del Seveso (comunque nell'ordine o di poco superiori ai 10 metri di altezza). L'analisi fotogeologica non ha rilevato segni che possano indicare condizioni di instabilità né tanto meno sono emersi elementi in tal senso dai rilievi in situ.

La tratta è caratterizzata dalla presenza di alcune attività estrattive ancora in atto (zona di Meda) e da aree invece interessate in passato da tali attività.

Altri elementi rilevati, legati alla dinamica fluviale, sono rappresentati da orli di terrazzi delimitanti morfologie blandamente più depresse e riconducibili a paleoalvei del Seveso e mostrano andamenti pressoché paralleli al corso del sistema torrentizio, per lo più orientati

nord - sud.

## 4.2. Caratterizzazione geotecnica del tracciato

La tratta oggetto della presente relazione è caratterizzata, lungo il tracciato, da un alternarsi frequente di strati, anche di spessore ed estensione limitati.

La fase di caratterizzazione è stata mirata in particolar modo a riassumere tale variabilità locale in parametri geotecnici di sintesi, prevedendo la sequenza stratigrafica verticale di seguito esposta.

**STRATO I:** Spessore variabile in media tra i 2-5 m. Strato superficiale allentato, che ha risentito maggiormente della decompressione legata al ritiro glaciale.

È costituito principalmente da limo sabbioso/limo argilloso da consistente a molto consistente, inglobante rara ghiaia e ghiaietto, i cui clasti risultano mediamente alterati. Basandosi su elementi di resistenza alla penetrazione, tale strato è caratterizzato da valori di  $N_{spt}$  mediamente tra 20-30.

A partire dalla progressiva 4+200 m e fino a fine tratta, si passa a sabbie limose inglobanti ghiaia e ghiaietto, con un grado di alterazione dei clasti medioelevato.

**STRATO II:** Compreso tra 2-5 m e 20-25 m. Strato composto da depositi che hanno subito

in minor grado la decompressione superficiale post-glaciale, conseguentemente più compatti.

È costituito da ghiaia/ghiaietto con clasti poligenici in matrice sabbioso-limoso. Il grado di alterazione dei clasti è medio. Solo localmente vi è la presenza di livelli centimetrici cementati, a partire dai 15-20 m. La resistenza alla penetrazione è elevata, con valori di  $N_{spt}$  in genere superiori ai 40, con frequenti risultati a rifiuto per la forte presenza di frazione ghiaiosa.

**STRATO III:** Presente al di sotto dei 20 m, e costituito da conglomerato poligenico moderatamente alterato, a struttura fortemente vacuolare e cementazione variabile tra debole e media. La resistenza alla penetrazione è elevata, con risultati di SPT superiori a 50 o a rifiuto.

Nella Tabella sottostante sono descritti i vari profili stratigrafici ricavati dai risultati delle prove in situ e di laboratorio, tratti dalle monografie dei profili di dettaglio. Inoltre, è possibile vedere l'assunzione del terreno ai fini della stima della propagazione delle onde vibrazionali.

Tab. 4.1 - Tipologia di terreni del tracciato principale della tratta B2 con assunzione di essi nello studio vibrazionale

<b>Progressiva (km)</b>	<b>Profondità strato (m)</b>	<b>Tipo di terreno</b>	<b>Assunzione del terreno nello studio vibrazionale</b>
0 – 0.9	0 - 6	Limo sabbioso argilloso preconsolidato	Mediamente addensato
	6 - 20	Ghiaia e ghiaietto, moderatamente alterati e localmente molto alterati	
0.9 – 2.1	0 - 5	Argilla limosa/limo argilloso molto consistente	Mediamente addensato
	5 - 20	Sabbia e sabbia limosa con ghiaia	
2.1 – 3.2	0 - 5	Limo sabbioso e limo argilloso da consistente a molto consistente	Mediamente addensato
	5 - 16	Ghiaia e sabbie solo localmente limose	
	16 - 35	Ghiaie e sabbie addensate, localmente grado di cementazione da debole a medio	
3.2 – 4.2	0 - 5	Limo sabbioso e limo argilloso da consistente a molto consistente	Mediamente addensato
	5 - 20	Ghiaia e sabbie solo localmente limose	
	20 - 35	Ghiaie e sabbie addensate, localmente grado di cementazione da debole a medio	
4.2 – 5.4	0 - 12	Sabbia limosa inglobante ghiaia/ghiaia e sabbia limosa	Mediamente addensato
	12 - 35	Ghiaia/ghiaietto in matrice sabbioso limosa, locali intervalli di conglomerato con grado di cementazione variabile	
5.4 – 6.0	0 – 15	Sabbia limosa inglobante ghiaia e ghiaietto	Mediamente addensato
	15 - 35	Ghiaia e ghiaietto in matrice sabbioso-limosa	
6.0 – 6.7	0 - 2	Sabbia limosa inglobante ghiaia e ghiaietto	Mediamente addensato
	2 - 20	Ghiaia e ghiaietto in matrice sabbiosa-limosa	
6.7 – 7.9	0 - 2	Sabbia limosa inglobante ghiaia e ghiaietto	Mediamente addensato



Progressiva (km)	Profondità strato (m)	Tipo di terreno	Assunzione del terreno nello studio vibrazionale
	2 - 20	Ghiaia e ghiaietto in matrice sabbioso-limosa	
7.9 – 9.0	0 - 2	Sabbia limosa inglobante ghiaia e ghiaietto	Mediamente addensato
	2 - 20	Ghiaia e ghiaietto in matrice sabbioso-limosa	
9.0 – 9.6	0 - 2	Sabbia limosa inglobante ghiaia e ghiaietto	Mediamente addensato
	2 - 20	Ghiaia e ghiaietto in matrice limo-sabbiosa	

Nella presente relazione, ai fini della stima della propagazione delle onde vibrazionali, è stato assunto il terreno nella totalità della tratta come **mediamente addensato**: esso è costituito da litologia delle argille-sabbie limose e/o limi argillosi o alla litologia dei limi argillosi-sabbiosi, presenti in maniera prevalente in tutti i sondaggi analizzati lungo il tracciato. Tale assunzione, oltre a derivare dai terreni presenti nei primi orizzonti stratigrafici, valutati a seguito delle prove in situ e di laboratorio, permette di attuare uno studio cautelativo.

Fino alla progressiva 4+200 m il terreno è costituito da limo sabbioso ed in parte da limo argilloso, che può essere assimilato al resto della tratta essendo di buona consistenza.

È giusto sottolineare la presenza di alcuni orizzonti ghiaiosi a maggiori profondità, per cui la propagazione delle onde vibrazionali risulterebbe meno gravosa; per questo, in tale analisi, sono stati considerati cautelativamente pari a terreni mediamente addensati citati in precedenza.

Le caratteristiche del terreno di tipologia **mediamente addensato** 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. CARATTERIZZAZIONE ANTE OPERAM

### 5.1. Censimento dei Ricettori

Nell'ambito delle analisi ante operam per la componente rumore è stato effettuato un dettagliato censimento dei ricettori. Tale censimento rimane valido per lo studio della componente vibrazioni.

Il censimento ha riguardato una fascia di 250 m per lato della nuova infrastruttura (fascia di pertinenza acustica ai sensi del DPR 142/04). L'indagine è stata estesa anche oltre tale fascia, fino a 300 metri, in caso di fronti edificati prossimi alla stessa, per la valutazione dei limiti di zonizzazione.

È stata effettuata, in particolare, una verifica della destinazione d'uso ed altezza di tutti i ricettori. I risultati di tale verifica sono stati riportati sulla cartografia numerica in scala 1:5000 (elaborati EACB2000GE00000PL001-004) e nelle Schede di Censimento dei Ricettori (elaborato EACB2000GE00000TV001).

Nelle planimetrie di censimento, in merito ai ricettori censiti sono state evidenziate mediante apposita campitura colorata le informazioni di seguito descritte:

#### **Tipologia dei ricettori**

Si è proceduto a rappresentare graficamente ogni singolo edificio individuato, applicando ad esso un riempimento di colorazione differente a seconda della tipologia associata. Le tipologie di edificio prese a riferimento sono di seguito elencate:

- Ricettori Sensibili (scuole, ospedali, case di cura, case di riposo);
- Edifici residenziali o ad uso turistico/ricettivo);
- Edifici industriali o commerciali, uffici; luoghi di culto, attività sportive;
- Altri ricettori (box, depositi, edifici dismessi)

#### **Codice identificativo**

Ad ognuno dei ricettori, in conformità al censimento eseguito per la fase di progettazione esecutiva, è stato assegnato un codice alfanumerico univoco di identificazione; in considerazione dell'elevato numero di ricettori oggetto di censimento, questi ultimi sono stati suddivisi con codici differenti a seconda della tratta di riferimento e di sotto-tratte individuate a seconda della progressiva chilometrica da ambo i lati dell'infrastruttura; la struttura della codifica assegnata ai ricettori è la seguente:

**xx – yyy-S/D - nnn**

dove:

- xx: identifica la tratta di riferimento (xx=B1 per ricettori individuati lungo la TRCO06, xx=B2 per ricettori individuati lungo la tratta B2, xx=C0 per ricettori individuati lungo la tratta C)
- yyy: identifica la sotto-tratta individuata a seconda della progressiva chilometrica (es. 001, 002, ecc per l'asse principale, numerazioni alternative come 101, 201, ecc per le viabilità connesse);
- S/D: distingue le sotto-tratte a seconda del lato dell'infrastruttura (Desto oppure Sinistro)
- zzz: codice progressivo di individuazione del ricettore

Per garantire una buona leggibilità nelle tavole prodotte in corrispondenza degli edifici sono riportate le ultime n.3 cifre del codice identificativo; le sotto-tratta di riferimento vengono invece rappresentate graficamente con tratteggio verde scuro e relativa etichetta identificativa. Si riporta di seguito un estratto delle tavole di censimento ricettori, relativo alla porzione territoriale afferente al lato destro della tratta B2 compresa tra la pk 0+000 e 1+000 (la cui sezione o sotto-tratta corrispondente viene denominata B2-000-D):



Le codifiche associate ai ricettori (e riportate nelle schede di censimento) sono pertanto B2000D139, B2000D140, ..., B2000D159.

Per ognuno dei ricettori censiti è stata inoltre prodotta una scheda di censimento riportante le seguenti informazioni:

- Dati identificativi:
  - Tratta di riferimento, lato e progressiva chilometrica
  - Comune di ubicazione ricettore
  - Numero progressivo di identificazione del ricettore
- Dati localizzativi:
  - Coordinate geografiche
  - Quota altimetrica (m s.l.m.)
  - Altezza del ricettore
  - Distanza dalla nuova infrastruttura
- Dati caratteristici del ricettore:
  - n. piani fuori terra
  - stato di conservazione
  - destinazione d'uso
- Caratterizzazione acustica
  - Classificazione Acustica secondo PCCA vigente
  - Presenza altre sorgenti di rumore (altre infrastrutture viarie, aree industriali, ...)

## 6. GLI IMPATTI CON LA REALIZZAZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO

L'esercizio della nuova viabilità è fonte di sollecitazioni dinamiche nel terreno circostante. Le cause di tali vibrazioni sono da ricondursi all'interazione del sistema veicolo/piattaforma/struttura di sostegno e dipendono da diversi fattori quali la tipologia di veicolo, le velocità di esercizio le caratteristiche della piattaforma, la tipologia di terreni e non ultimo le caratteristiche strutturali dei fabbricati.

Le vibrazioni sono in grado di determinare effetti indesiderati sulla popolazione esposta e sugli edifici. Il disturbo sulle persone, classificato come "annoyance", dipende in misura variabile dall'intensità e frequenza dell'evento disturbante e dal tipo di attività svolta. Le vibrazioni possono causare danni agli edifici in alcune situazioni, o in presenza di caratteristiche di estrema suscettività strutturale o di elevati e prolungati livelli di sollecitazione dinamica. Tali situazioni si verificano tuttavia in corrispondenza di livelli di vibrazione notevoli, superiori di almeno un ordine di grandezza rispetto ai livelli tipici dell'annoyance.

Nel caso specifico il territorio interessato dal progetto è di tipo rurale e parzialmente urbanizzato, caratterizzato da una prevalenza di aree residenziali.

Le tipologie edilizie prevalenti in adiacenza al tracciato sono rappresentate da edifici in muratura con fondazioni direttamente immorsate nel terreno e edifici di recente edificazione con ossatura in cemento armato e fondazioni continue. L'edificazione appare omogenea e caratterizzata da abitazioni vicine o palazzine con struttura in c.a. e altezza media di tre piani.

Per quanto riguarda le sorgenti vibrazionali attualmente presenti si evidenziano una serie di infrastrutture stradali di vario tipo a singola carreggiata, che in alcuni casi corrono parallelamente alla strada esistente e in altri casi ne attraversano il tracciato.

### 6.1. La propagazione delle onde vibrazionali

Il quadro previsionale è stato sviluppato mediante l'adozione di un modello di propagazione teorico supportato da dati sperimentali. Nel caso specifico, a seguito di indagini specifiche del territorio in esame, sono stati utilizzati i dati desunti dai rilievi vibrazionali eseguite per valutare la catena di trasmissione delle vibrazioni.

Per valutare le potenziali situazioni di impatto vibrazionale è necessario conoscere i tre elementi di seguito elencati:

- emissione della sorgente;
- propagazione nei terreni;
- risposta dei fabbricati.

I tre elementi suddetti rappresentano pertanto la base indispensabile per lo sviluppo del modello sperimentale.

Il livello di vibrazione in corrispondenza di un ricettore ad una distanza "x" dalla sede ferroviaria è pari al livello alla distanza di riferimento "x<sub>0</sub>", diminuito della somma delle attenuazioni che si verificano nel terreno tra x<sub>0</sub> e x:

$$L(x) = L(x_0) - \sum_i A_i$$

Il livello di base  $L(x_0)$  è generalmente ricavato da misure sperimentali svolte in adiacenza alle linee ferroviarie a distanze comprese tra 3 m e 25 m.

In maggior dettaglio, 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. In generale, in caso di sorgenti superficiali, la funzione di propagazione delle vibrazioni è del tipo seguente e dipende dalla distanza, dalla tipologia di suolo e di sorgente di emissione:

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

Il metodo previsionale dei livelli di vibrazione ha impiegato simulazioni numeriche, basate su funzioni di propagazione di tipo logaritmico opportunamente ricavate tramite regressione logaritmica da misure sperimentali effettuate in campo. Tale metodologia permette di caratterizzare la propagazione della sorgente, in questo caso traffico ferroviario, in relazione alle caratteristiche intrinseche del terreno.

In dettaglio, si illustrano i passi seguiti nell'elaborazione. La valutazione dei livelli vibrazionali è stata condotta a fronte dell'acquisizione dell'emissione del fenomeno considerato (transito dei diversi tipi di veicoli), utilizzando rilievi strumentali eseguiti in corrispondenza di opere civili specifiche (p.es. viadotto e/o galleria). Le indagini sperimentali sono state eseguite impiegando tre terne accelerometriche posizionate a distanze note (p.es. 1m, 15m e 30m) dalla sorgente vibratoria (traffico stradale), le quali hanno acquisito i dati afferenti al vettore somma, come richiesto dalla UNI 9614:2017, contemporaneamente. In simultanea ai rilievi delle vibrazioni sono stati acquisiti i mezzi effettivamente transitati. Questa metodologia di condurre l'indagine ha permesso la successiva associazione fra tipologia di evento e tipologia di mezzo transitato.

La caratterizzazione di emissione dei veicoli (come vettore medio e deviazione standard della popolazione del campione in esame) ha permesso la successiva fase di taratura e verifica del modello di propagazione determinando il Vettore Immissione e il Vettore Residuo nelle postazioni di indagine, i quali hanno permesso conseguentemente la determinazione del Vettore vibrazione della sorgente.

Nella fase di predizione del modello di propagazione, variando i parametri di input della sorgente come il numero di veicoli e la velocità in relazione alla loro tipologia è possibile predire il relativo Vettore Sorgente in funzione dei diversi parametri. Tale Vettore, una volta tarato, è stato ulteriormente elaborato per tenere in considerazione dell'amplificazione delle vibrazioni interne agli edifici e dell'incertezza associata al modello previsionale.

Di seguito un grafico di esempio nel quale sono riportati i punti che individuano il Vettore Sorgente alle diverse distanze prese in esame, i punti con del Vettore Sorgente con la relativa amplificazione, necessaria per la valutazione interna agli edifici, ed infine le posizioni del Vettore Sorgente che oltre all'amplificazione considera l'incertezza associata al modello. Ad ogni popolazione di punti è associata la relativa funzione di regressione logaritmica che approssima la funzione di propagazione delle vibrazioni e che sarà usata per la predizione del livello di vibrazioni ai ricettori. Nei paragrafi seguenti sono commentate e definite le funzioni di variazione della funzione di trasferimento in base alla variazione della velocità di transito, l'analisi dell'amplificazione delle vibrazioni interne agli edifici e all'incertezza associata al modello.

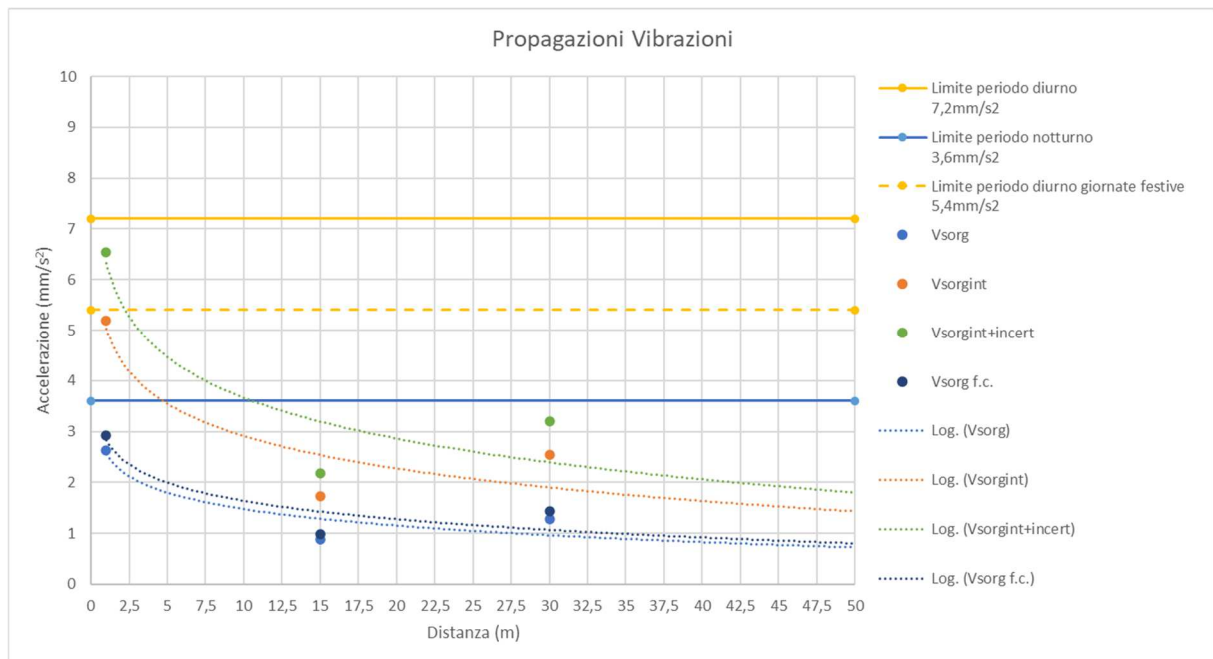


Figura 6-1 - Funzioni di trasferimento delle vibrazioni in base ai dati sperimentali (Azzurro), a seguito della taratura applicando un fattore correttivo (blu), con l'incremento del f.c. e dell'amplificazione (giallo), con l'incremento del f.c., dell'amplificazione ed incertezza del modello (verde)

### 6.1.1. Attenuazione geometrica

L'attenuazione geometrica per una linea di emissione di lunghezza infinita (lunghezza del treno maggiore della distanza sorgente-ricettore) si esprime come:

$$A_g = 20 \cdot \log_{10}((d+d_0)/d)^n$$

dove:

- d      distanza dall'asse della linea ferroviaria;
- d<sub>0</sub>    distanza di riferimento;
- n=0,5   per galleria;
- n=1    per tracciato di superficie.

### 6.1.2. Velocità di transito

La velocità di transito dei veicoli ha un effetto significativo sul disturbo vibrazionale negli edifici, anche se spesso inferiore a quanto potrebbe essere atteso sulla base di considerazioni soggettive.

I livelli di vibrazione variano con legge logaritmica in base dieci in funzione delle variazioni nella velocità del mezzo, ossia:

$$L = L_0 + 10 \div 20 \cdot \log\left(\frac{V}{V_0}\right)$$

dove:

- $L$  e  $L_0$ : sono i livelli di vibrazioni in decibel;
- $V$  e  $V_0$ : sono le rispettive velocità di transito dei veicoli.

Dalla relazione sopra riportata si evince che al raddoppiare della velocità di transito si produce un incremento di 6 dB nei livelli di vibrazione e ciò in maniera indipendente dalla frequenza.

### 6.1.3. Caratterizzazione della sorgente

Per quanto concerne la sorgente costituita dal complesso veicolo-piattaforma è necessaria la conoscenza dei seguenti elementi base:

- a) caratteristiche del traffico transitante:
- b) tipologia di piattaforma

### 6.1.4. Propagazione delle onde nei terreni

La varietà delle conformazioni morfologiche del terreno comporta le maggiori incertezze di valutazione della propagazione delle vibrazioni. I fattori che possono influire nella determinazione dell'attenuazione nel terreno sono molteplici ed i più determinanti sono costituiti dalla natura del mezzo, dal suo grado di costipazione, dall'attrito statico fra i granuli e quindi dalla granulometria, dalla fratturazione del mezzo, dalla presenza di acqua e da altri fattori la cui differente combinazione può determinare gradi di attenuazione differenti in mezzi litologicamente simili,

Agli effetti dell'analisi del terreno alle azioni dinamiche risulta quindi determinante la suddivisione tra rocce lapidee (tipo A nella norma UNI 9916) e rocce sciolte (da tipo B a tipo F nella norma UNI 9916),

In generale le rocce lapidee trasmettono tutta la gamma di frequenze e principalmente le più alte, mentre le rocce sciolte lasciano passare solo le basse frequenze, che comunque corrispondono a quelle di risposta degli edifici. Inoltre, mentre le rocce lapidee difficilmente possono subire variazioni di struttura sotto sollecitazioni dinamiche, le rocce sciolte, risultano di gran lunga più sensibili. La loro risposta alla azione di disturbo è diversa a seconda che l'intensità del disturbo sia lieve o al contrario forte: in altre parole il comportamento dei materiali sciolti è fortemente non lineare. Nel primo caso non si ha una vera variazione della struttura mentre nel secondo caso la vibrazione produce per tutte le rocce sciolte un assestamento e quindi una riduzione di porosità. Ciò avviene in misura maggiore per le rocce incoerenti poiché i granuli sottoposti a vibrazione perdono resistenza di attrito e quindi vengono favoriti fenomeni di scorrimento con assestamenti. I ricettori interessati dallo studio sorgono prevalentemente su terreni limosi-argillosi di varia natura e granulometria come riscontrabile dalla carta geologica presente negli elaborati di progetto.

L'analisi delle caratteristiche geolitologiche degli strati superficiali del terreno è finalizzata al riconoscimento dei parametri correlabili alla propagazione delle vibrazioni nel terreno. I valori tipici di densità, velocità di propagazione e fattore di perdita, noti esclusivamente per alcune classi geologiche e in presenza di un ammasso omogeneo, sono riassunti nella sottostante tabella:

Tipo di Terreno	Densità [t/m <sup>3</sup> ]	Velocità di Propagazione [m/s]	Fattore di Perdita $\eta$
Roccia compatta	2,65	3500	0,01
Sabbia, limo, ghiaia, loess	1,6	600	0,1
Argilla, terreni argillosi	1,7	1500	0,2÷0,5

Tab. 6.1 - Valori tipici di densità, velocità di propagazione e fattore di perdita per tipologia di terreno

L'attenuazione dovuta all'assorbimento del terreno è stata calcolata con la formula:

$$A_t = 4,34 \cdot \Omega \cdot \eta \cdot x/c$$

dove:

- x: distanza dall'asse della linea ferroviaria
- $\Omega$ : frequenza [rad\*s<sup>-1</sup>]
- $\eta$ : coefficiente di assorbimento del terreno (fattore di perdita)

$$c = (E/d)^{1/2}$$

- c: velocità di propagazione dell'onda longitudinale nel terreno
- E: modulo elastico
- d: densità del terreno

L'attenuazione dovuta alle discontinuità del terreno è stata considerata in modo semplificato ammettendo che l'onda di compressione si sposti dal suolo "a" al suolo "c" e che incida perpendicolarmente alla superficie di separazione dei due mezzi:

$$A_i = 20 \cdot \log[(1 + d_c \cdot c_c / d_a \cdot c_a) / 2]$$

dove:

- $d_c, d_a$  = densità dei suoli "c" e "a"
- $c_c, c_a$  = velocità di propagazione nei suoli "c" e "a"

In considerazione della tipologia dei terreni interessati, per la costruzione del modello sperimentale sono stati utilizzati i dati rilevati dalla campagna di rilievi in campo, si nota che, conoscendo la mutua distanza tra le postazioni, dai dati sperimentali è possibile estrapolare le funzioni di attenuazione che descrivono la propagazione nel terreno dell'onda vibrazionale in funzione della distanza.

### 6.1.5. Propagazione delle onde nelle strutture edilizie

La propagazione delle vibrazioni negli edifici antistanti le linee ferroviarie e la risposta di pareti e solai dipende dalle caratteristiche costruttive dell'edificio, al fine delle valutazioni è importante separare due aspetti fondamentali del fenomeno:

- l'interazione suolo-fondazioni;



- la propagazione nel corpo dell'edificio.

Il primo aspetto è legato al fatto che la mancanza di solidarietà all'interfaccia terreno-struttura dà luogo a fenomeni dissipativi, configurandosi come un fenomeno favorevole. Detto fenomeno è perciò condizionato dalla tipologia delle fondazioni (fondazioni a platea, fondazioni su plinti isolati, pali di fondazioni, ecc.). Nel caso di fondazioni a platea la grande area di contatto con il terreno determina una perdita di accoppiamento praticamente nulla alle basse frequenze fino alla frequenza di risonanza della fondazione. Per le altre tipologie di fondazioni possono essere utilizzate curve empiriche che consentono la stima dei livelli di vibrazione della fondazione in funzione dei livelli di vibrazione del terreno.

La propagazione nel corpo dell'edificio è determinante sia per il disturbo agli abitanti sia per la resistenza delle strutture in quanto i pavimenti, pareti e soffitti degli edifici sono soggetti a significative amplificazioni delle vibrazioni rispetto a quelle trasmesse dalle fondazioni. In molti casi la risonanza delle strutture orizzontali può causare un'amplificazione delle vibrazioni nel campo di frequenze comprese tra 10 e 30 Hz. I problemi maggiori si verificano quando la frequenza di risonanza dei solai coincide con la frequenza di picco dello spettro di vibrazione del terreno. Negli edifici multipiano un valore di attenuazione delle vibrazioni da piano a piano è approssimativamente pari a 3 dB. I risultati di misure sperimentali (Ishii e Tachibana) in un edificio a 10 piani fuori terra con struttura in calcestruzzo armato e acciaio mostrano un'attenuazione di circa 1 dB alle basse frequenze in corrispondenza dei piani alti e maggiore di 3 dB ai primi piani.

La norma DIN 4150 riferisce che, nel caso di vibrazioni orizzontali le frequenze proprie dei piani di un edificio seguono all'incirca la legge  $f = 10/n$ , essendo  $n$  il numero del piano. Per la componente verticale si hanno circa  $f = 10$  Hz per pavimenti poco rigidi e  $f = 30$  Hz per pavimenti molto rigidi. Gli incrementi per risonanza possono essere dell'ordine di 3÷8 volte, con rari casi di incrementi fino a 15 volte. Risultati analoghi sono stati ottenuti nel corso di misure eseguite dalle Ferrovie Svizzere: generalmente si ha un'attenuazione nelle componenti orizzontali  $x$  e  $y$  ( $f = 0\div 80$  Hz) tra suolo e piano terra degli edifici, ma si verifica un'amplificazione della componente verticale  $z$  tra suolo e piano terra e suolo-primo piano. Mediamente l'amplificazione sul pavimento è di 5 dB per frequenze di risonanza di circa 20 Hz, ma può arrivare anche a 20 dB nel caso del pavimento del piano terra con frequenza di risonanza di circa 40 Hz.

La differenza tra il livello di vibrazione del terreno e quello delle strutture di fondazione è detta attenuazione per perdita di accoppiamento (coupling loss). Sono disponibili valori sperimentali medi della perdita di accoppiamento in funzione della frequenza per fondazioni su pali nel terreno o su plinti di edifici in muratura, con o senza intelaiatura. Per fondazioni a platea generale, dato che la vibrazione della stessa può essere considerata simile a quella che si verificherebbe nel terreno senza la presenza della platea, la perdita di accoppiamento è zero alle basse frequenze fino alla frequenza di risonanza della platea.

Eseguendo un'analisi più ampia del fenomeno della variazione delle vibrazioni a seguito della trasmissione dal terreno al corpo di fabbrica dell'edificio si andranno a considerare alcune strutture complesse e casi di effetti delle vibrazioni, per opere analoghe, all'interno degli edifici .

Considerando la struttura complessa degli edifici, collegata al terreno mediante sistemi di fondazione di vario genere, i livelli di accelerazione riscontrabili all'interno degli stessi possono presentare sia attenuazioni che amplificazioni rispetto ai livelli sul terreno.

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. Detto fenomeno è condizionato dalla tipologia delle fondazioni (a platea, su plinti isolati, su travi rovesce, su pali, etc.). Nel caso di fondazioni a platea la grande area di contatto con il terreno determina una perdita di accoppiamento praticamente di 0 dB alle basse

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

Di seguito si riportano le curve di attenuazione dovute a diversi tipi di fondazione.

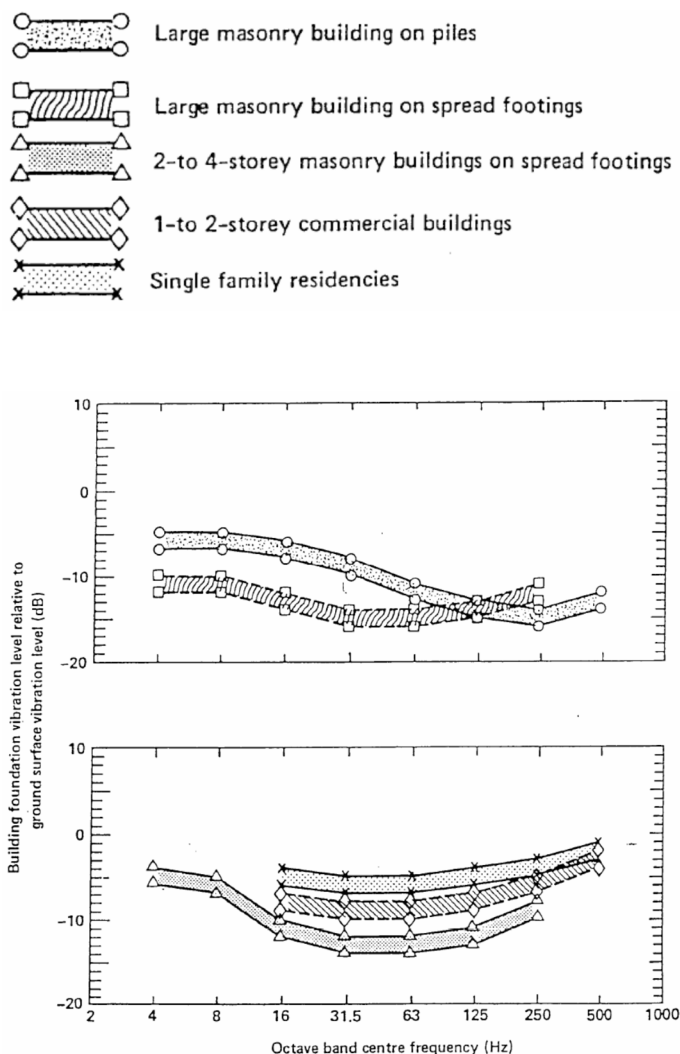


Figura 6-2 - curve di attenuazione dovute a diversi tipi di fondazione

Oltre alla variazione delle vibrazioni per l'accoppiamento struttura/suolo è possibile l'instaurarsi del fenomeno della risonanza strutturale di elementi dei fabbricati, in particolare dei solai: allorché la frequenza di eccitazione coincide con la frequenza naturale di oscillazione libera della struttura, la stessa manifesta un rilevante aumento dei livelli di vibrazione rispetto a quelli presenti alla base della stessa.

Nella figura successiva è evidenziato il possibile campo di amplificazione delle vibrazioni dovuto alla risonanza dei solai, che oscilla fra 5 e 12 dB nel campo di frequenze rilevanti dal punto di vista dei transiti di mezzi.

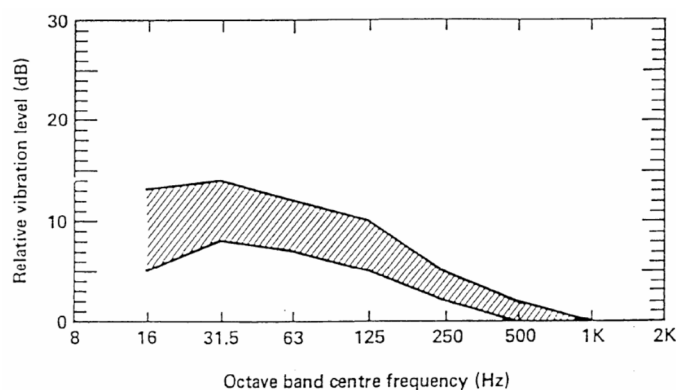


Figura 6-3 - curve di amplificazione prodotte dai solai

Passando da ogni piano a quello sovrastante si verifica una progressiva riduzione dei livelli di vibrazione trasmessi. La curva seguente mostra il campo di variabilità tipico di tale attenuazione interpiano.

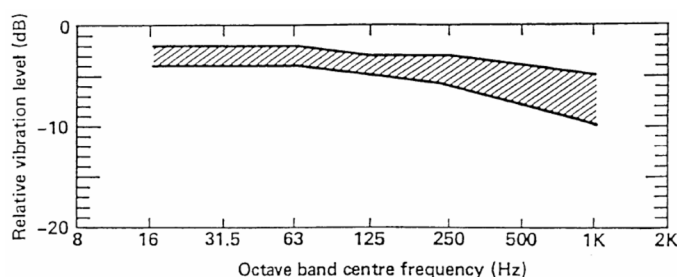


Figura 6-4 - curve di attenuazione da un solaio al successivo

In riferimento a dati disponibili in bibliografia si hanno i seguenti ulteriori risconti.

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

Le misure di Ishii e Tachibana mostrano una attenuazione interpiano che varia progressivamente da 3 dB ai piani bassi sino a 1 dB negli ultimi piani per un edificio a dieci piani con struttura in calcestruzzo armato e acciaio.

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

È ovvio, quindi, come l'effetto complessivo di questi fenomeni possa in genere portare ad una variazione dei livelli di vibrazione, misurati al centro dei solai, da 0 a 12 dB rispetto ai livelli sul terreno.

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

Si valuta l'attenuazione delle fondazioni. Essa viene assunta pari a 0 dB per le fondazioni a platea, a 3 dB per fondazioni su travi rovesce in CLS, ed a 5 dB nel caso di fondazioni in muratura o comunque nel caso di fondazioni che non abbiano capacità di immorsamento.

Si valuta l'amplificazione dovuta alla risonanza dei solai. Il valore di base assunto è una amplificazione di 5 dB per solai in laterocemento con frequenza propria di 20 Hz. A questo valore di base si può valutare di aggiungono i seguenti effetti:

- effetto della variazione della frequenza di risonanza: se la stessa è maggiore di 20 Hz e minore di 40 Hz, si incrementa linearmente il valore di base, che viene fatto variare da 5 dB a 20 Hz sino a 20 dB a 40 Hz;
- effetto dell'incastro del solaio: appoggio semplice -2.0 dB; incastro imperfetto 0.0 dB; incastro perfetto +5.0 dB;
- rapporto rigidità/peso specifico del materiale: solaio in laterocemento 0.0 dB; volte o archi in muratura -4.0 dB;
- spessore del solaio:  $h = 40 \text{ cm} +8.0 \text{ dB}$ ,  $h = 30 \text{ cm} +3.0 \text{ dB}$ ,  $h = 24 \text{ cm} 0.0 \text{ dB}$ ,  $h = 12 \text{ cm} -2.5 \text{ dB}$ ;
- luce del solaio:  $L = 10 \text{ m} -4.0 \text{ dB}$ ,  $L = 7 \text{ m} -3.0 \text{ dB}$ ,  $L = 5 \text{ m} -2.0 \text{ dB}$ ,  $L = 4 \text{ m} 0.0 \text{ dB}$ ,  $L = 3.5 \text{ m} +3.0 \text{ dB}$ ,  $L = 3.0 \text{ m} +8.0 \text{ dB}$ ;
- attenuazione interpiano: si assume prudenzialmente una riduzione di 1 dB per ogni piano al di sopra del piano terra.

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

Le tipologie edilizie prevalenti in adiacenza al tracciato sono rappresentate da edifici sia in muratura, con fondazioni direttamente immorsate nel terreno, che edifici di recente edificazione con ossatura in cemento armato e fondazioni continue. L'edificazione appare omogenea e caratterizzata da abitazioni vicine e altezza media di tre piani.

In queste condizioni, sulla base di quanto sin ora detto, la differenza tra il livello di vibrazione del terreno e quello dell'edificio si stima cautelativamente pari a + 5 dB per l'effetto combinato delle componenti positive, quali la perdita di accoppiamento suolo-fondazioni e l'attenuazione da piano a piano, e delle componenti negative di attenuazione, quali la risonanza alle frequenze proprie dei solai. L'approccio cautelativo con cui viene affrontato il tema è confermato anche da studi bibliografici di riferimento<sup>1</sup>.

### 6.1.6. Incertezza del modello

È noto come la valutazione previsionale delle vibrazioni a cui è soggetto un edificio in prossimità di infrastrutture viarie sia estremamente difficoltosa a causa delle numerose variabili del calcolo. In letteratura si stima che la previsione di un modello di simulazione, pur conoscendo molti parametri, può avvenire con un livello di incertezza che può variare da 2 dB a 10 dB in funzione dell'accuratezza dell'informazione dei parametri disponibili e presi a riferimento.

Allo scopo di contenere l'incertezza sulla stima sono state fatte le seguenti considerazioni, che conducono ad una stima cautelativa dei livelli di vibrazione:

- a) i livelli di vibrazione sono stati tarati su base sperimentale con una incertezza inferiore a 5 dB,

---

<sup>1</sup> 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.

- b) i dati di input delle sorgenti vibratorie sono stati considerati con riferimento alla massima emissione vibratoria, ottenendo così il valore massimo anche presso i ricettori,
- c) per valutare in modo cautelativo le vibrazioni immesse nell'edificio si è trascurata la perdita per trasmissione all'interno dell'edificio, utilizzando dunque il valore di vibrazione senza perdite,
- d) la valutazione dei livelli di vibrazione viene fornita in termini di distanza dall'asse ferroviario con approssimazione al metro superiore.

Ne consegue che la valutazione del superamento, pur avendo una incertezza intrinseca che può variare da 2 dB a 10 dB, dovuta alla difficoltà di modellizzazione del complesso fenomeno fisico che si vuole rappresentare, risulta sicuramente cautelativa.

In relazione all'analisi dei dati di indagine disponibili, alla valutazione della struttura del terreno derivante dall'esame del contesto geologico eseguito per questo modello sarà considerata una incertezza pari a 2 dB.

Per la valutazione della conformità sarà adottato il sistema, secondo la UNI TS/11326-2:2015, di valutazione A) ossia, accettazione ristretta + rifiuto allargato. Si considerano pertanto "entro il limite" solo i livelli che risultano certamente conformi, ovvero quei valori a cui è sommata l'incertezza risulta dal confronto con il limite, risultano entro i valori limite ossia sarà determinata la distanza entro la quale si individuano possibili fasce di superamento del limite.

### 6.1.7. Rumore trasmesso per via solida dalle strutture

Il rumore solido all'interno degli edifici è il risultato delle onde acustiche irradiate dalle superfici della stanza, includendo le pareti, i pavimenti, i soffitti e tutti gli altri elementi normalmente presenti quali finestre, porte, ecc. La relazione tra le ampiezze di vibrazione delle superfici della stanza ed i livelli di pressione sonora all'interno della stanza stessa è funzione del valore medio del coefficiente di assorbimento acustico che caratterizza le superfici, dalla dimensione e forma della stanza e della distribuzione del campo di vibrazione sulle superfici vibranti.

Studi basati su considerazioni teoriche hanno consentito di formulare la seguente relazione che lega i livelli di pressione sonora con i livelli di vibrazione in accelerazione rilevabili in corrispondenza dell'orizzontamento della stanza:

$$L_p = L_a - 20 \cdot \log(f) + 16$$

dove:

$L_p$ : livello di pressione sonora in dB (0 dB = 20  $\mu$ Pa)

$L_a$ : livello di vibrazione di accelerazione all'orizzontamento in dB (0 dB = 1  $\mu$ g)

$f$ : frequenza per bande a terzi di ottava in Hz

L'applicazione del modello di propagazione del rumore solido per i ricettori analizzati nel presente studio non evidenzia situazioni di criticità preventivabili. Lo stato degli infissi di ciascun edificio, potrebbe ridurre notevolmente l'insorgere di condizioni di attenzione per gli stessi ricettori potenzialmente interessati da livelli di vibrazioni disturbanti, qualora i vetri entrino in risonanza, vibrino ed emettano all'interno del locale un rumore avente le medesime frequenze.

## 6.2. Indagini vibrometriche, taratura e validazione del modello

Per la caratterizzazione dell'emissione dell'infrastruttura stradale in progetto è stata effettuata una campagna di misure di vibrazioni mediante installazione di tre terne accelerometriche in tre sezioni lungo tratti stradali con caratteristiche analoghe.

Le sezioni di caratterizzazione della sorgente sono state individuate nei seguenti tratti esistenti:

- tratto a raso della SS35 località "Cesano Maderno", indagato il 06.02.23;
- tratto in galleria artificiale della SS 35 in località "Lentate sul Seveso", indagato il 07.02.23;
- tratto a raso della SP 173, Via Edoardo Ferravilla in località "Desio", indagato in 02.02.23.

Le sezioni di indagine sono state scelte per analogia alle sezioni stradali prevista nell'intervento in oggetto. Dall'analisi in post elaborazione dei dati sperimentali, rilevati dalle sezioni di misura, sono stati individuati gli eventi ed a essi associata la tipologia di veicolo che ha compiuto il transito. Tale valutazione ha permesso quindi la caratterizzazione dell'emissione delle vibrazioni per ogni tipologia di veicolo.

### 6.2.1. Caratterizzazione emissione sorgente stradale a raso ed in rilevato per la viabilità di grande comunicazione

Di seguito si riportano le informazioni della sezione di indagine delle vibrazioni. Per il report di dettaglio dell'indagine si rimanda al "REPORT MISURE VIBROMETRICHE" (cod. elab. EACB2000GE00000RS004a).



Figura 6-5 Planimetria della postazione di installazione della strumentazione di misura per la caratterizzazione del rilevato (nel riquadro il dettaglio del transetto SEZ.1-VIB.01-a-b-c)

Di seguito si riporta il dettaglio delle postazioni del transetto di indagine

<b>Postazione SEZ.1 VIB.1.a,</b> Postazione di misura a 10m dalla carreggiata	<b>Postazione SEZ.1 VIB.1.b,</b> Postazione di misura a 20m dalla carreggiata	<b>Postazione SEZ.1 VIB.1.c,</b> Postazione di misura a 30m dalla carreggiata
		

Figura 6-6 Postazione di installazione strumentazione di misura, particolare delle postazioni di indagine

Di seguito si riportano le time history, rappresentanti il vettore somma della terna di misura posizionate alla distanza di circa 10m (VIB 1.a), circa 20m (VIB 1.b) e circa 30 m (VIB 1.c) dalla carreggiata a raso. Come è possibile rilevare dai grafici nella postazione VIB 1.a è evidente il contributo della sorgente traffico (eventi di transito), nella postazione VIB 1.b il contributo traffico diminuisce e inizia ad essere riconoscibile il contributo del residuo (sorgenti locali), mentre nella postazione VIB 1.c il traffico ha un contributo ancora più limitato ed il contributo delle altre sorgenti risulta più evidente.

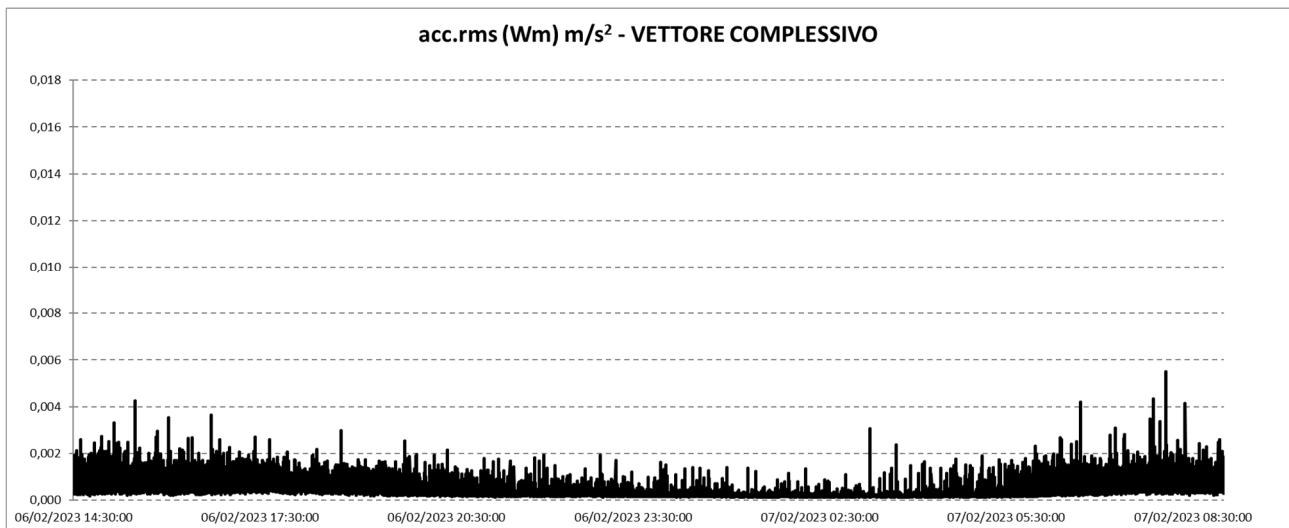


Figura 6-7 Postazione di installazione time history – vettore complessivo SEZ.1 VIB.1.a

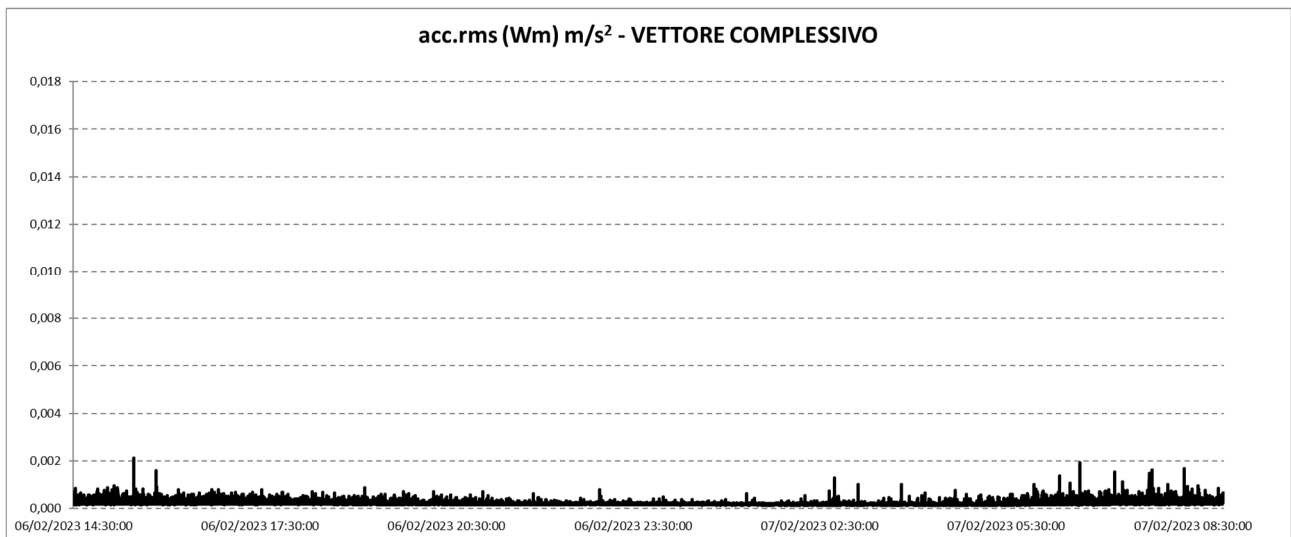


Figura 6-8 Postazione di installazione time history – vettore complessivo SEZ.1 VIB.1.b

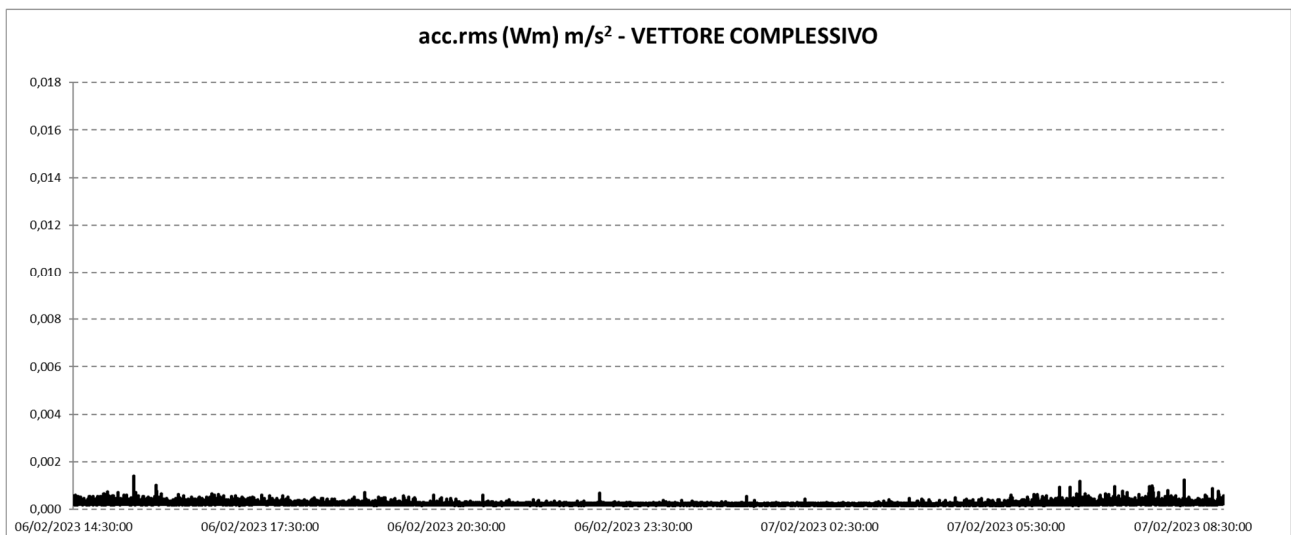


Figura 6-9 Postazione di installazione time history – vettore complessivo SEZ.1 VIB.1.c

In base ai dati rilevati dal monitoraggio del traffico, si è proceduto a identificare nella time history delle postazioni di indagini gli eventi associati alla tipologia di veicoli. In particolare, sono stati individuati eventi relativi a veicoli leggeri (auto) e veicoli pesanti (distinti in furgone, camion ed autoarticolato).

Di seguito il vettore e la deviazione standard che caratterizza la sorgente veicoli nel periodo di osservazione dell'indagine sperimentale.

Postazione	Tipologia veicolo	numero transiti considerati per la caratterizzazione	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$
VIB 1.a – 10 m dalla carreggiata a raso	Autoarticolati	717	0,0017	0,0004
	Camion	717	0,0012	0,0001
	Furgoni	717	0,0010	0,0001
	Auto	1991	0,0006	0,0001



Postazione	Tipologia veicolo	numero transiti considerati per la caratterizzazione	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$
VIB 1.b – 20 m dalla carreggiata a raso	Autoarticolati	717	0,0005	0,0002
	Camion	717	0,0004	0,0000
	Furgoni	717	0,0002	0,0000
	Auto	1991	0,0002	0,0000
VIB 1.c – 30 m dalla carreggiata a raso	Autoarticolati	717	0,0004	0,0001
	Camion	717	0,0003	0,0000
	Furgoni	717	0,0000(*)	0,0000(*)
	Auto	1991	0,0000(*)	0,0000(*)

(\*): evento non identificabile

Il vettore residuo è stato ottenuto dall'indagine sperimentale e pari ai seguenti valori:

Vettore residuo misurato			
Postazione	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vres $a_w,95$ $m/s^2$
VIB 1.a – 10 m dalla carreggiata a raso	0,0003	0,0000	0,0004
VIB 1.b – 20 m dalla carreggiata a raso	0,0002	0,0000	0,0003
VIB 1.c – 30 m dalla carreggiata a raso	0,0003	0,0000	0,0003

Per effettuare la verifica del modello della sorgente stradale si è proceduto, a partire dalla caratterizzazione della sorgente traffico per tipologia di veicolo, al calcolo del vettore sorgente del periodo di indagine (che non coincide necessariamente con il periodo diurno e/o notturno essendo la sorgente sempre la stessa indipendentemente dal periodo che si considera) ed a confrontarlo con il vettore sorgente ottenuto dalla misura.

Il vettore immissione misurato dall'indagine sperimentale è pari ai seguenti valori:

Vettore immissione misurato			
Postazione	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vimm $a_w,95$ $m/s^2$
VIB 1.a – 10 m dalla carreggiata a raso	0,0010	0,0005	0,0018
VIB 1.b – 20 m dalla carreggiata a raso	0,0004	0,0002	0,0007
VIB 1.c – 30 m dalla carreggiata a raso	0,0004	0,0001	0,0006

Il vettore immissione calcolato partendo dalla caratterizzazione della sorgente e considerando la stessa velocità e numero di veicoli è pari a:

Vettore immissione calcolato			
Postazione	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vimm $a_w,95$ $m/s^2$
VIB 1.a – 10 m dalla carreggiata a raso	0,0010	0,0004	0,0017
VIB 1.b – 20 m dalla carreggiata a raso	0,0003	0,0001	0,0005
VIB 1.c – 30 m dalla carreggiata a raso	0,0003	0,0001	0,0004

Ne consegue la determinazione del Vettore sorgente nel caso di Vettore Immissione misurato e Vettore Immissione calcolato.

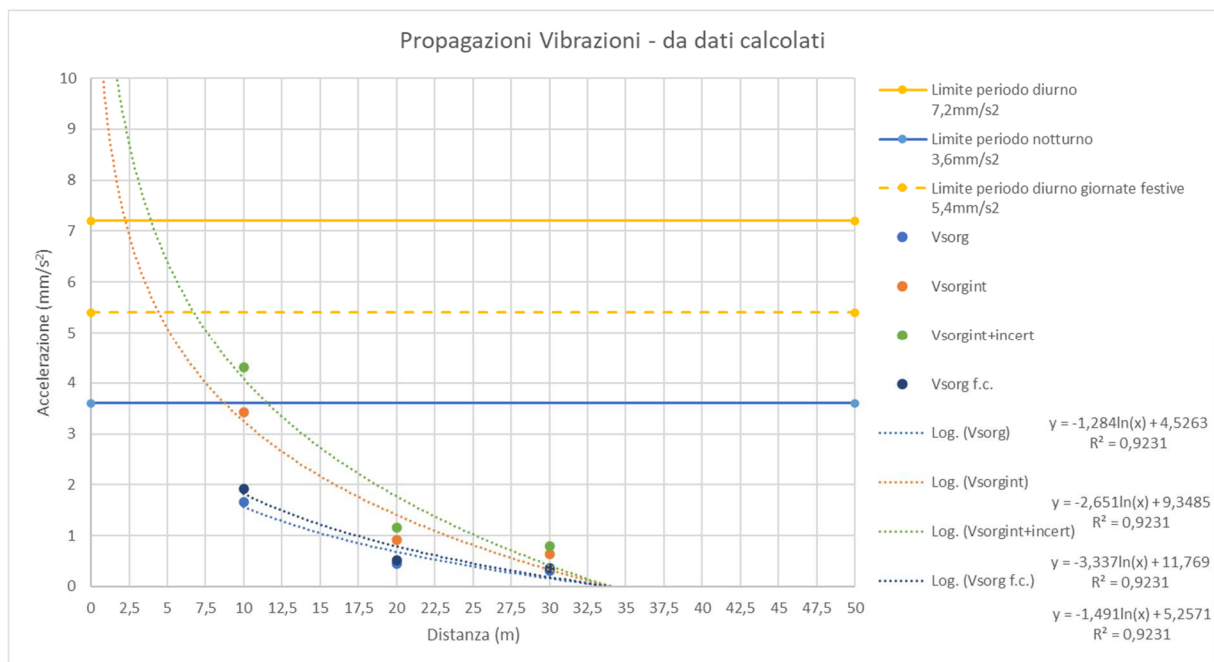
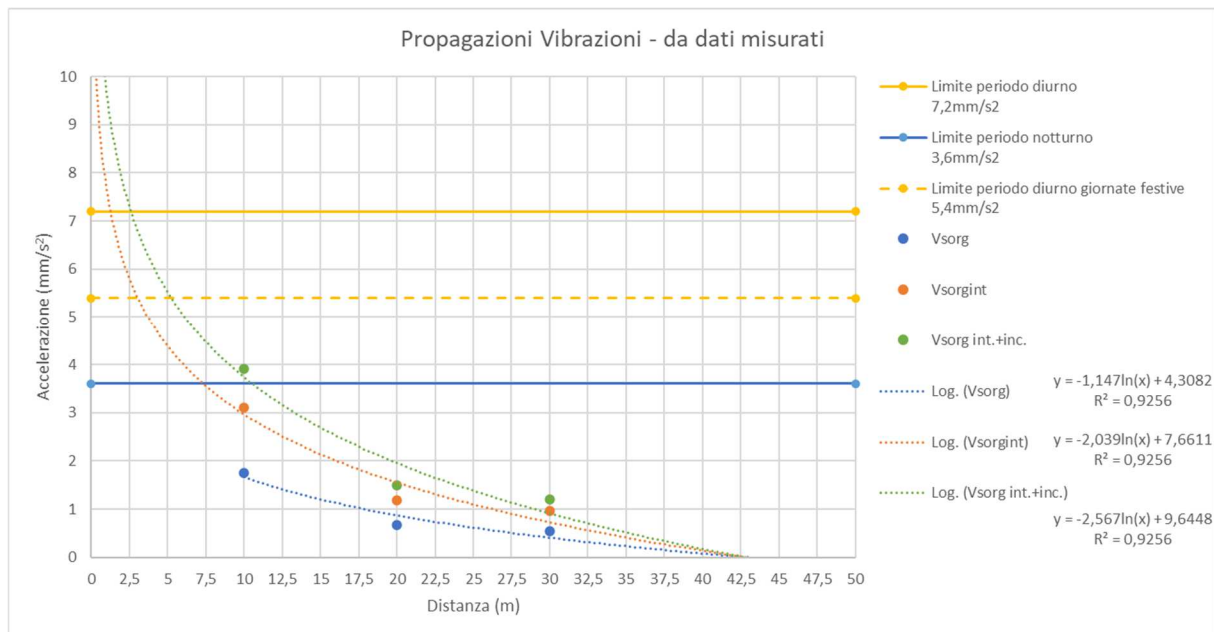
<b>Vettore sorgente</b>			
<b>Postazione</b>	<b>Vettore sorgente calcolato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Vettore sorgente misurato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Differenza tra calcolato e misurato mm/s<sup>2</sup></b>
VIB 1.a – 10 m dalla carreggiata a raso	1,7	1,7	-0,09
VIB 1.b – 20 m dalla carreggiata a raso	0,4	0,7	-0,22
VIB 1.c – 30 m dalla carreggiata a raso	0,3	0,5	-0,23

Dall'analisi del confronto dei valori del Vettore Sorgente calcolato e misurato si riscontra una leggera sottostima del vettore sorgente calcolato a tutte le distanze considerate. In considerazione di quanto evidenziato si procederà ad inserire un fattore correttivo che permetterà di tarare il modello e conseguentemente la funzione di trasferimento.

<b>Vettore sorgente – individuazione fattore correttivo</b>					
<b>Postazione</b>	<b>Vettore sorgente calcolato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Fattore correttivo dB</b>	<b>Vettore sorgente calcolato corretto mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Vettore sorgente misurato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Differenza tra calcolato e misurato mm/s<sup>2</sup></b>
VIB 1.a – 10 m dalla carreggiata a raso	1,7	+1,3	1,9	1,7	+0,18
VIB 1.b – 20 m dalla carreggiata a raso	0,4		0,5	0,7	-0,15
VIB 1.c – 30 m dalla carreggiata a raso	0,3		0,4	0,5	-0,18

In base all'applicazione del fattore correttivo si riscontano uno scostamento tra valori calcolati e valori misurati da -0.18 mm/s<sup>2</sup> a +0.18 mm/s<sup>2</sup>.

Al fine della determinazione della propagazione delle vibrazioni nel terreno e all'interno degli edifici compresa l'incertezza del modello si provvederà a determinare la funzione di trasferimento a mezzo di regressione logaritmica determinata sia dai dati misurati che dai dati calcolati ai quali è stato applicato il fattore correttivo.



In base alle funzioni di regressione determinate dai set di dati di input considerati, al fine di valutarne l'eventuale scostamento, si riporta di seguito la tabella di confronto. I dati riportati di seguito fanno riferimento al periodo di acquisizione dei dati sperimentali e non al periodo diurno o notturno; essi hanno lo scopo di verificare lo scostamento delle predizioni usando le regressioni derivanti o da dati misurati o da dati predetti al fine di validare quest'ultimi.

Valutazione della funzione di trasferimento di propagazione delle vibrazioni nel terreno			
Distanza (x) m	funzione di propagazione basata su dati calcolati (+f.c.) $y=-1,491\ln(x)+5,2571$	funzione di propagazione basata su dati misurati $y=-1,147\ln(x)+4,3082$	Differenza tra calcolato e misurato mm/s <sup>2</sup>
	Vsorg f.c. - mm/s <sup>2</sup>	Vsorg - mm/s <sup>2</sup>	
10	1,8	1,7	+0,16
20	0,8	0,9	-0,08
30	0,2	0,4	-0,22

Valutazione della funzione di trasferimento di propagazione delle vibrazioni considerando l'amplificazione degli edifici (+5dB) e l'incertezza del modello (+2dB)			
Distanza (x) m	funzione di propagazione basata su dati calcolati $y=-3,337\ln(x)+11,769$	funzione di propagazione basata su dati misurati $y=-2,567\ln(x)+9,6448$	Differenza tra calcolato e misurato mm/s <sup>2</sup>
	Vsorg f.c. - mm/s <sup>2</sup>	Vsorg - mm/s <sup>2</sup>	
10	4,1	3,7	+0,35
20	1,8	2,0	-0,18
30	0,4	0,9	-0,49

Come si riscontra dal confronto fra la predizione ottenuta da dati calcolati a cui è applicato il fattore correttivo e la predizione della funzione di trasferimento ottenuta dai dati misurati si ottiene uno scostamento tra valori calcolati e valori misurati tra -0,22 mm/s<sup>2</sup> e +0,16 mm/s<sup>2</sup> nel caso della funzione di trasferimento nel terreno; valori tra -0,49 mm/s<sup>2</sup> e +0,35 mm/s<sup>2</sup> nel caso della funzione di trasferimento che considera l'amplificazione negli edifici e l'incertezza modellistica.

Al fine dell'applicazione del modello definito in precedenza si deve valutare l'eventuale differenza tra il sito di indagine sperimentale, il quale ha permesso la definizione del modello, e l'inserimento del tracciato nel reale contesto geologico. In questo caso dalla valutazione geologica effettuata, ed alla quale si rimanda per maggiori dettagli, non si riscontrano tali singolarità e/o condizioni da far inserire fattori di variazioni del modello per differenze del territorio.

In considerazione di quanto ottenuto si ritiene il modello tarato e cautelativo per la valutazione della propagazione delle vibrazioni in corrispondenza del viadotto.

## 6.2.2. Caratterizzazione emissione sorgente stradale in galleria artificiale per la viabilità di grande comunicazione

Di seguito si riportano le informazioni della sezione di indagine delle vibrazioni. Per il report di dettaglio dell'indagine si rimanda al "REPORT MISURE VIBROMETRICHE" (cod. elab. EACB2000GE00000RS004a).



Figura 6-10 Planimetria della postazione di installazione della strumentazione di misura per la caratterizzazione del rilevato (nel riquadro il dettaglio del transetto SEZ.2-VIB.02-a-b-c)

Di seguito si riporta il dettaglio delle postazioni del transetto di indagine

<b>Postazione SEZ.2 VIB.2.a,</b> Postazione di misura a 1m dalla carreggiata	<b>Postazione SEZ.2 VIB.2.b,</b> Postazione di misura a 8m dalla carreggiata	<b>Postazione SEZ.2 VIB.2.c,</b> Postazione di misura a 15m dalla carreggiata

Figura 6-11 Postazione di installazione strumentazione di misura, particolare delle postazioni di indagine

Di seguito si riportano le time history, rappresentanti il vettore somma della terna di misura posizionate alla distanza di circa 1m (VIB 2.a), circa 8m (VIB 2.b) e circa 15 m (VIB 2.c) dalla galleria artificiale. Come è possibile rilevare dai grafici nella postazione VIB 2.a è evidente il contributo della sorgente traffico (eventi di transito), nella postazione VIB 2.b il contributo traffico diminuisce e inizia ad essere riconoscibile il contributo del residuo (sorgenti locali), mentre nella postazione VIB 2.c il traffico ha un contributo ancora più limitato ed il contributo delle altre sorgenti risulta più evidente.

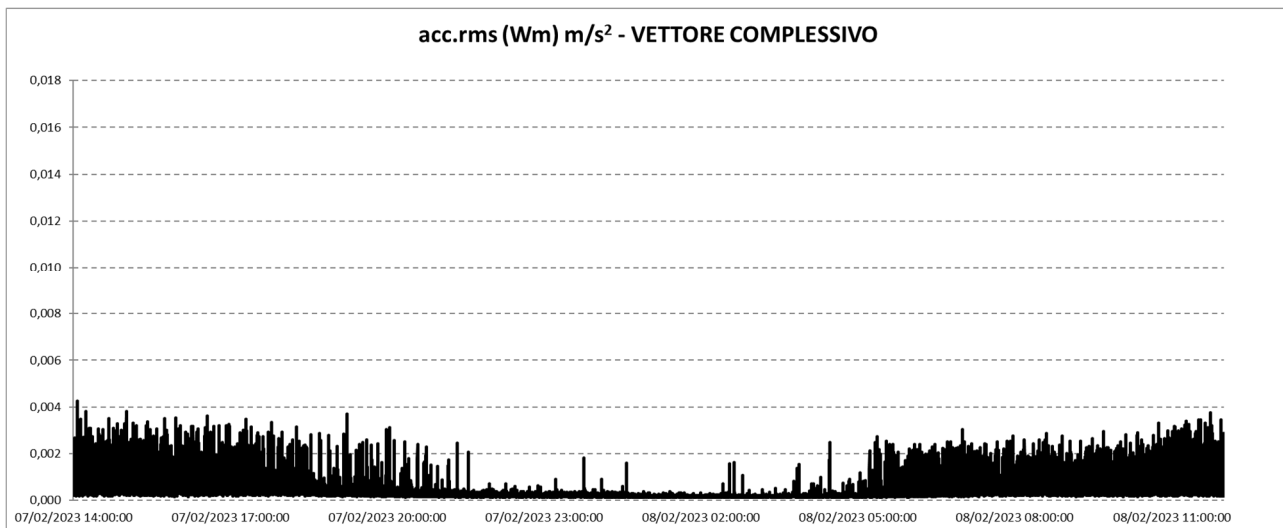


Figura 6-12 Postazione di installazione time history – vettore complessivo SEZ.2 VIB.2.a

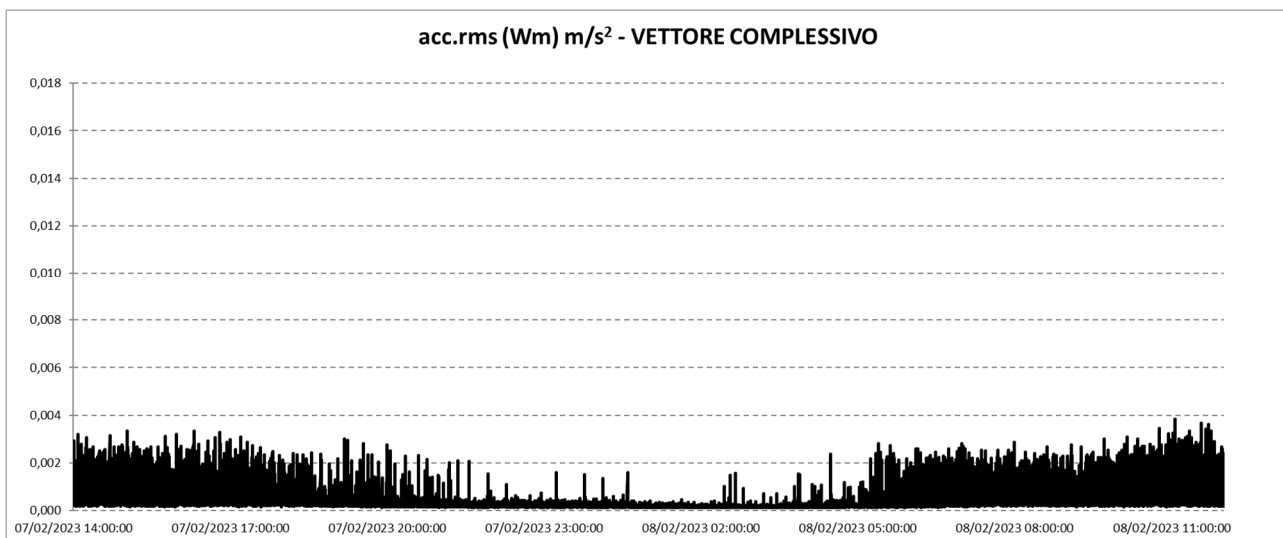


Figura 6-13 Postazione di installazione time history – vettore complessivo SEZ.2 VIB.2.b

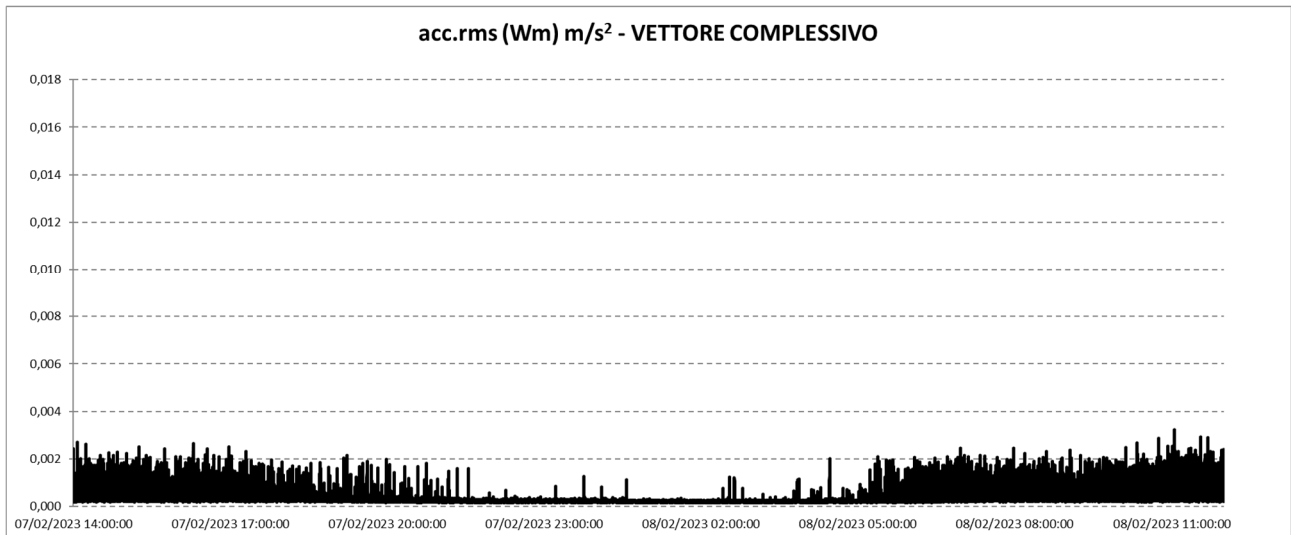


Figura 6-14 Postazione di installazione time history – vettore complessivo SEZ.2 VIB.2.c

In base ai dati rilevati dal monitoraggio del traffico, si è proceduto a identificare nella time history delle postazioni di indagini gli eventi associati alla tipologia di veicoli. In particolare, sono stati individuati eventi relativi a veicoli leggeri (auto) e veicoli pesanti (distinti in furgone, camion ed autoarticolato).

Di seguito il vettore e la deviazione standard che caratterizza la sorgente veicoli nel periodo di osservazione dell'indagine sperimentale.

Postazione	Tipologia veicolo	numero transiti considerati per la caratterizzazione	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$
VIB 2.a – 1 m dalla galleria artificiale	Autoarticolati	717	0,0023	0,0004
	Camion	717	0,0013	0,0002
	Furgoni	717	0,0008	0,0001
	Auto	1810	0,0005	0,0001
VIB 2.b – 8 m dalla galleria artificiale	Autoarticolati	717	0,0022	0,0004
	Camion	717	0,0013	0,0002
	Furgoni	717	0,0008	0,0001
	Auto	1810	0,0004	0,0001
VIB 2.c – 15 m dalla galleria artificiale	Autoarticolati	717	0,0017	0,0003
	Camion	717	0,0010	0,0002
	Furgoni	717	0,0006	0,0001
	Auto	1810	0,0003	0,0001

Il vettore residuo è stato ottenuto dall'indagine sperimentale e pari ai seguenti valori:

Vettore residuo misurato			
Postazione	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vres $a_w,95$ $m/s^2$
VIB 2.a – 1 m dalla galleria artificiale	0,0002	0,0000	0,0003
VIB 2.b – 8 m dalla galleria artificiale	0,0002	0,0000	0,0003
VIB 2.c – 15 m dalla galleria artificiale	0,0003	0,0000	0,0003

Per effettuare la verifica del modello della sorgente stradale si è proceduto, a partire dalla caratterizzazione della sorgente traffico per tipologia di veicolo, al calcolo del vettore sorgente del periodo di indagine (che non coincide necessariamente con il periodo diurno e/o notturno essendo la sorgente sempre la stessa indipendentemente dal periodo che si considera) ed a confrontarlo con il vettore sorgente ottenuto dalla misura.

Il vettore immissione misurato dall'indagine sperimentale è pari ai seguenti valori:

<b>Vettore immissione misurato</b>			
<b>Postazione</b>	<b>Media <math>a_w</math> max m/s<sup>2</sup></b>	<b>Sigma scarto <math>a_w</math> m/s<sup>2</sup></b>	<b>Vimm <math>a_w,95</math> m/s<sup>2</sup></b>
VIB 2.a – 1 m dalla galleria artificiale	0,0010	0,0007	0,0023
VIB 2.b – 8 m dalla galleria artificiale	0,0009	0,0007	0,0021
VIB 2.c – 15 m dalla galleria artificiale	0,0009	0,0005	0,0018

Il vettore immissione calcolato partendo dalla caratterizzazione della sorgente e considerando la stessa velocità e numero di veicoli è pari a:

<b>Vettore immissione calcolato</b>			
<b>Postazione</b>	<b>Media <math>a_w</math> max m/s<sup>2</sup></b>	<b>Sigma scarto <math>a_w</math> m/s<sup>2</sup></b>	<b>Vimm <math>a_w,95</math> m/s<sup>2</sup></b>
VIB 2.a – 1 m dalla galleria artificiale	0,0010	0,0007	0,0022
VIB 2.b – 8 m dalla galleria artificiale	0,0009	0,0006	0,0021
VIB 2.c – 15 m dalla galleria artificiale	0,0007	0,0005	0,0016

Ne consegue la determinazione del Vettore sorgente nel caso di Vettore Immissione misurato e Vettore Immissione calcolato.

<b>Vettore sorgente</b>			
<b>Postazione</b>	<b>Vettore sorgente calcolato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Vettore sorgente misurato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Differenza tra calcolato e misurato mm/s<sup>2</sup></b>
VIB 2.a – 1 m dalla galleria artificiale	2,2	2,3	-0,07
VIB 2.b – 8 m dalla galleria artificiale	2,0	2,1	-0,05
VIB 2.c – 15 m dalla galleria artificiale	1,6	1,8	-0,17

Dall'analisi del confronto dei valori del Vettore Sorgente calcolato e misurato si riscontra una leggera sottostima del vettore sorgente calcolato a tutte le distanze considerate. In considerazione di quanto evidenziato si procederà ad inserire un fattore correttivo che permetterà di tarare il modello e conseguentemente la funzione di trasferimento.



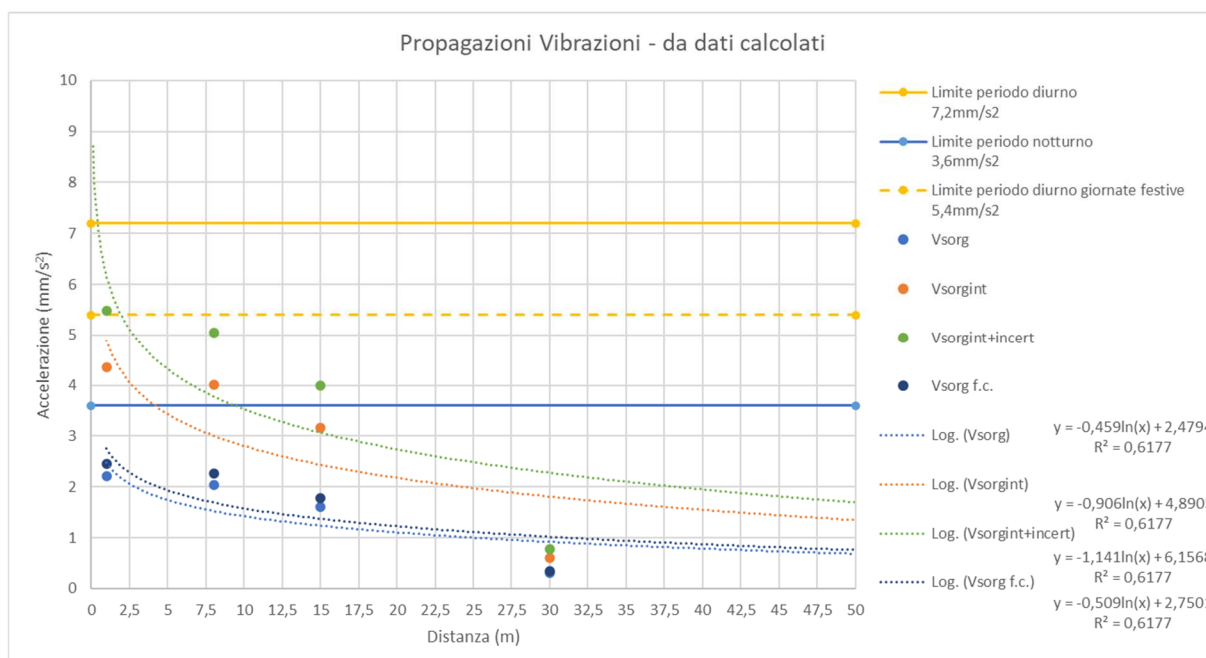
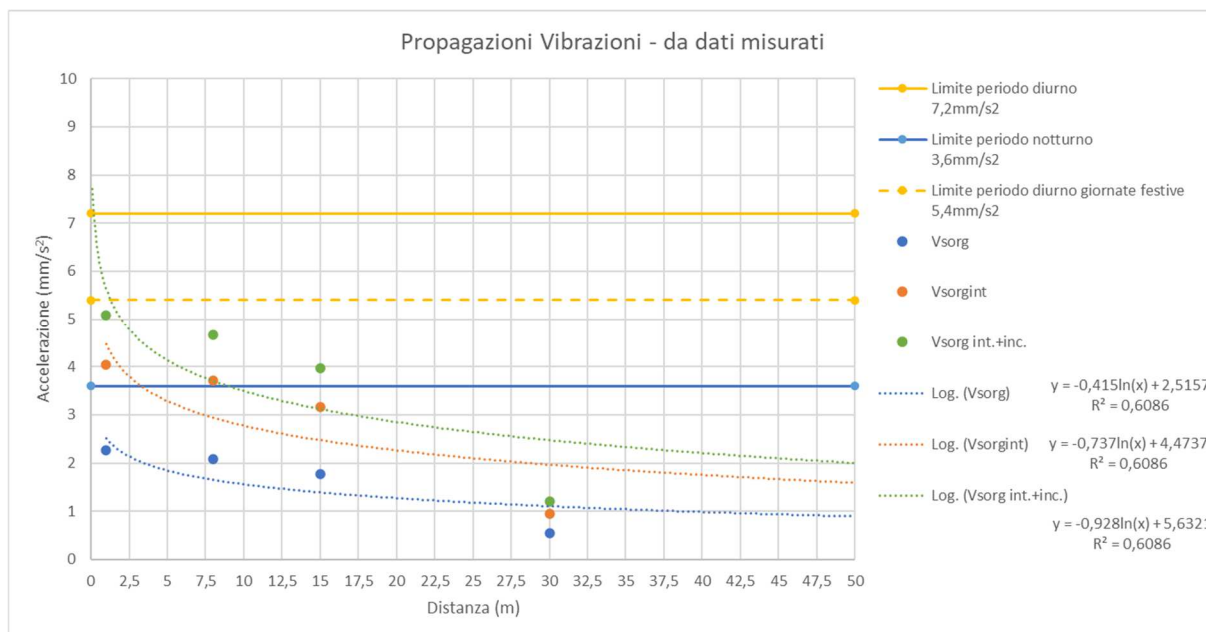
<b>Vettore sorgente – individuazione fattore correttivo</b>					
<b>Postazione</b>	<b>Vettore sorgente calcolato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Fattore correttivo dB</b>	<b>Vettore sorgente calcolato corretto mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Vettore sorgente misurato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Differenza tra calcolato e misurato mm/s<sup>2</sup></b>
VIB 2.a – 1 m dalla galleria artificiale	2,2	0,9	2,4	2,3	0,18
VIB 2.b – 8 m dalla galleria artificiale	2,0		2,3	2,1	0,17
VIB 2.c – 15 m dalla galleria artificiale	1,6		1,8	1,8	0,01

In base all'applicazione del fattore correttivo si riscontrano uno scostamento tra valori calcolati e valori misurati da +0.01 mm/s<sup>2</sup> a +0.18 mm/s<sup>2</sup>.

Al fine di definire la funzione di trasferimento, oltre alle tre postazioni considerate nel transetto della sezione 2, si considera nella regressione una ulteriore postazione a 30m considerando come riferimento la postazione di indagine VIB 1.c della sezione 1 di caratterizzazione della carreggiata a raso. Tale assunzione si ritiene compatibile con la propagazione delle vibrazioni in quanto si riscontra dalle indagini effettuate che per la sezione 1 a 10m si misura 1,9 mm/s<sup>2</sup> e per la sezione 2 a 15m si misura 1,8 mm/s<sup>2</sup>, quindi fra loro compatibili. Di seguito la tabella di riscontro del fattore correttivo applicato per la taratura del modello.

<b>Vettore sorgente – individuazione fattore correttivo</b>					
<b>Postazione</b>	<b>Vettore sorgente calcolato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Fattore correttivo dB</b>	<b>Vettore sorgente calcolato corretto mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Vettore sorgente misurato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Differenza tra calcolato e misurato mm/s<sup>2</sup></b>
VIB 2.a – 1 m dalla galleria artificiale	2,2	+0,9	2,4	2,3	0,18
VIB 2.b – 8 m dalla galleria artificiale	2,0		2,3	2,1	0,17
VIB 2.c – 15 m dalla galleria artificiale	1,6		1,8	1,8	0,01
VIB 1.c – 30 m dalla carreggiata a raso	0,3		0,3	0,5	-0,20

Al fine della determinazione della propagazione delle vibrazioni nel terreno e all'interno degli edifici compresa l'incertezza del modello si provvede a determinare la funzione di trasferimento a mezzo di regressione logaritmica determinata sia dai dati misurati che dai dati calcolati ai quali è stato applicato il fattore correttivo.



In base alle funzioni di regressione determinate dai set di dati di input considerati, al fine di valutarne l'eventuale scostamento, si riporta di seguito la tabella di confronto. I dati riportati di seguito fanno riferimento al periodo di acquisizione dei dati sperimentali e non al periodo diurno o notturno; essi hanno lo scopo di verificare lo scostamento delle predizioni usando le regressioni derivanti o da dati misurati o da dati predetti al fine di validare quest'ultimi.

Valutazione della funzione di trasferimento di propagazione delle vibrazioni nel terreno			
Distanza (x) m	funzione di propagazione basata su dati calcolati (+f.c.) $y=-0,459\ln(x)+2,4794$	funzione di propagazione basata su dati misurati $y=-0,415\ln(x)+2,5157$	Differenza tra calcolato e misurato mm/s <sup>2</sup>
	Vsorg f.c. - mm/s <sup>2</sup>	Vsorg - mm/s <sup>2</sup>	
1	2,5	2,5	-0,04
8	1,5	1,7	-0,13
15	1,2	1,4	-0,16
30	0,9	1,1	-0,19

Valutazione della funzione di trasferimento di propagazione delle vibrazioni considerando l'amplificazione degli edifici (+5dB) e l'incertezza del modello (+2dB)			
Distanza (x) m	funzione di propagazione basata su dati calcolati $y=-1,141\ln(x)+6,1568$	funzione di propagazione basata su dati misurati $y=-0,928\ln(x)+5,6321$	Differenza tra calcolato e misurato mm/s <sup>2</sup>
	Vsorg f.c. - mm/s <sup>2</sup>	Vsorg - mm/s <sup>2</sup>	
1	6,2	5,6	+0,52
8	3,8	3,7	+0,08
15	3,1	3,1	-0,05
30	2,3	2,5	-0,20

Come si riscontra dal confronto fra la predizione ottenuta da dati calcolati a cui è applicato il fattore correttivo e la predizione della funzione di trasferimento ottenuta dai dati misurati si ottiene uno scostamento tra valori calcolati e valori misurati tra -0,04 mm/s<sup>2</sup> e -0,19 mm/s<sup>2</sup> nel caso della funzione di trasferimento nel terreno; valori tra -0,20 mm/s<sup>2</sup> e +0,52 mm/s<sup>2</sup> nel caso della funzione di trasferimento che considera l'amplificazione negli edifici e l'incertezza modellistica.

Al fine dell'applicazione del modello definito in precedenza si deve valutare l'eventuale differenza tra il sito di indagine sperimentale, il quale ha permesso la definizione del modello, e l'inserimento del tracciato nel reale contesto geologico. In questo caso dalla valutazione geologica effettuata, ed alla quale si rimanda per maggiori dettagli, non si riscontrano tali singolarità e/o condizioni da far inserire fattori di variazioni del modello per differenze del territorio.

In considerazione di quanto ottenuto si ritiene il modello tarato e cautelativo per la valutazione della propagazione delle vibrazioni in corrispondenza del viadotto.

### 6.2.3. Caratterizzazione emissione sorgente stradale a raso ed in rilevato per la viabilità locale

Di seguito si riportano le informazioni della sezione di indagine delle vibrazioni. Per il report di dettaglio dell'indagine si rimanda al "REPORT MISURE VIBROMETRICHE" (cod. elab. EACB2000GE00000RS004a).



Figura 6-15 Planimetria della postazione di installazione della strumentazione di misura per la caratterizzazione del rilevato (nel riquadro il dettaglio del transetto SEZ.3-VIB.03-a-b-c)

Di seguito si riporta il dettaglio delle postazioni del transetto di indagine

<b>Postazione SEZ.3 VIB.3.a,</b> Postazione di misura a 2m dalla carreggiata	<b>Postazione SEZ.3 VIB.3.b,</b> Postazione di misura a 7m dalla carreggiata	<b>Postazione SEZ.3 VIB.3.c,</b> Postazione di misura a 12m dalla carreggiata

Figura 6-16 Postazione di installazione strumentazione di misura, particolare delle postazioni di indagine

Di seguito si riportano le time history, rappresentanti il vettore somma della terna di misura posizionate alla distanza di circa 2m (VIB 3.a), circa 7m (VIB 3.b) e circa 12 m (VIB 3.c) dalla

careggiata a raso. Come è possibile rilevare dai grafici nella postazione VIB 3.a è evidente il contributo della sorgente traffico (eventi di transito), nella postazione VIB 3.b il contributo traffico diminuisce e inizia ad essere riconoscibile il contributo del residuo (sorgenti locali), mentre nella postazione VIB 3.c il traffico ha un contributo ancora più limitato ed il contributo delle altre sorgenti risulta più evidente.

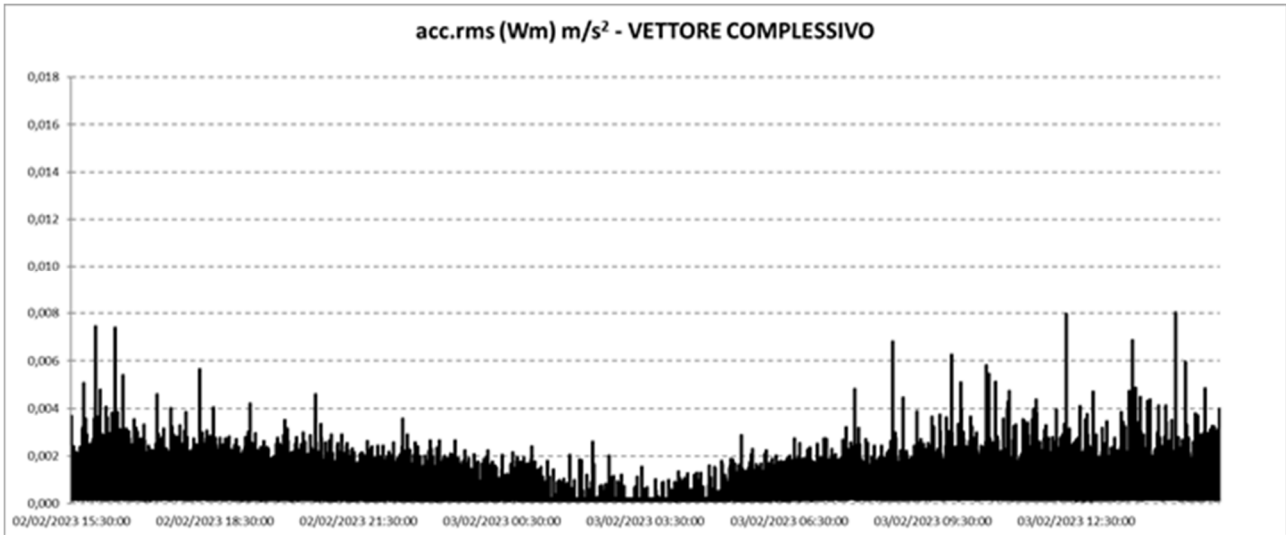


Figura 6-17 Postazione di installazione time history – vettore complessivo SEZ.3 VIB.3.a

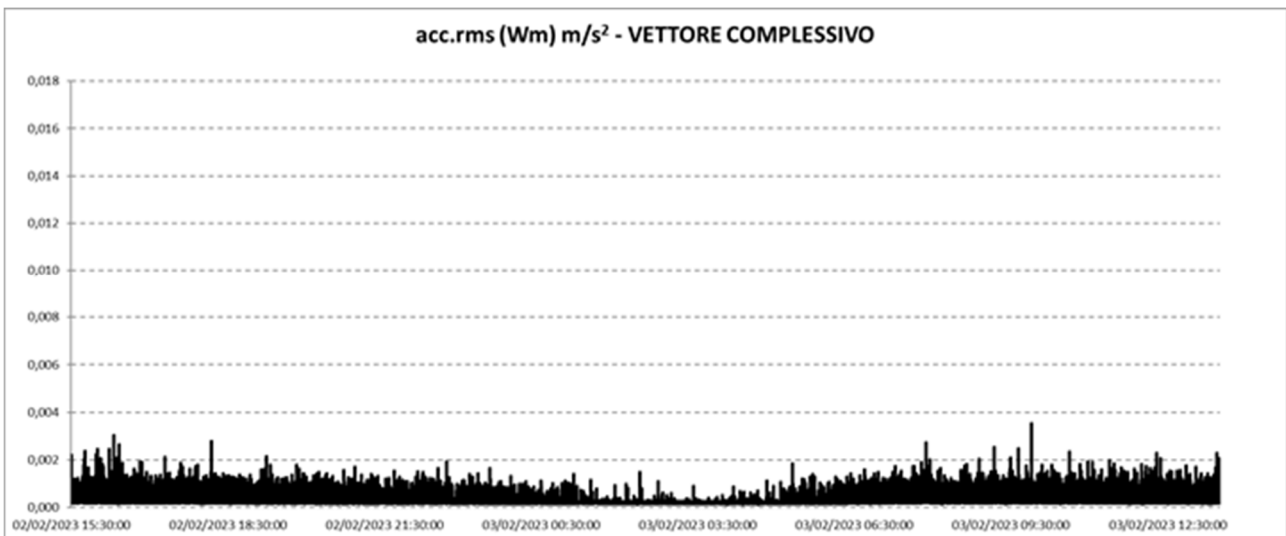


Figura 6-18 Postazione di installazione time history – vettore complessivo SEZ.3 VIB.3.b

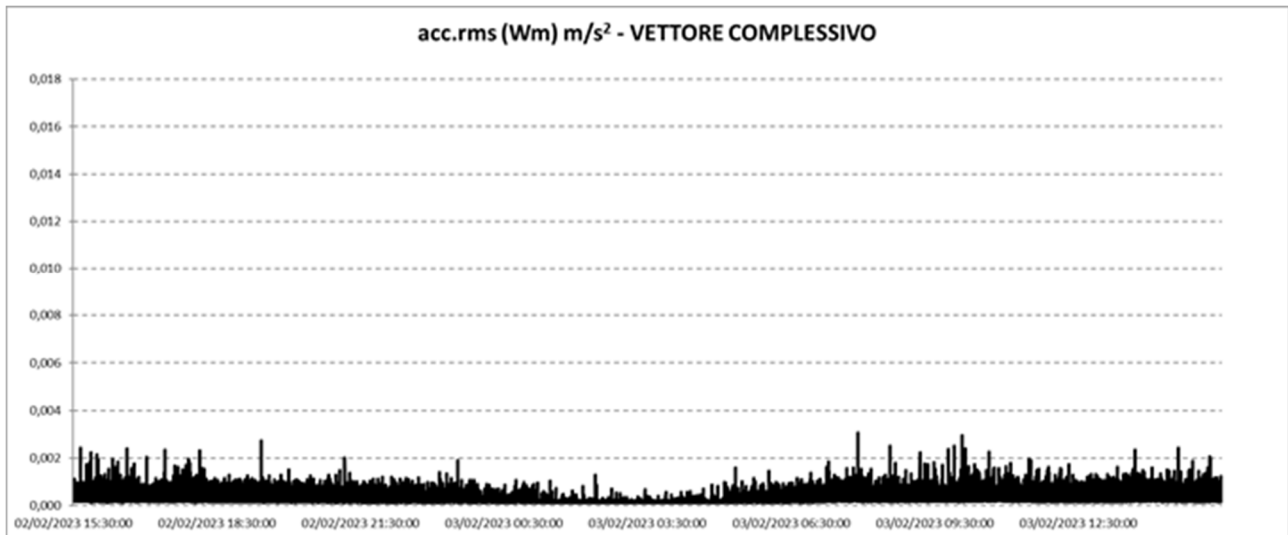


Figura 6-19 Postazione di installazione time history – vettore complessivo SEZ.3 VIB.3.c

In base ai dati rilevati dal monitoraggio del traffico, si è proceduto a identificare nella time history delle postazioni di indagini gli eventi associati alla tipologia di veicoli. In particolare, sono stati individuati eventi relativi a veicoli leggeri (auto) e veicoli pesanti (distinti in furgone, camion ed autoarticolato).

Di seguito il vettore e la deviazione standard che caratterizza la sorgente veicoli nel periodo di osservazione dell'indagine sperimentale.

Postazione	Tipologia veicolo	numero transiti considerati per la caratterizzazione	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$
VIB 3.a – 2 m dalla carreggiata a raso	Autoarticolati	255	0,0034	0,0009
	Camion	255	0,0024	0,0001
	Furgoni	255	0,0022	0,0001
	Auto	8295	0,0012	0,0005
VIB 3.b – 7 m dalla carreggiata a raso	Autoarticolati	255	0,0014	0,0003
	Camion	255	0,0011	0,0000
	Furgoni	255	0,0010	0,0000
	Auto	2451	0,0007	0,0002
VIB 3.c – 12 m dalla carreggiata a raso	Autoarticolati	255	0,0014	0,0003
	Camion	255	0,0011	0,0000
	Furgoni	255	0,0010	0,0000
	Auto	5146	0,0006	0,0001

Il vettore residuo è stato ottenuto dall'indagine sperimentale e pari ai seguenti valori:

Vettore residuo misurato			
Postazione	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vres $a_w,95$ $m/s^2$
VIB 3.a – 2 m dalla carreggiata a raso	0,0002	0,0000	0,0003
VIB 3.b – 7 m dalla carreggiata a raso	0,0003	0,0000	0,0004
VIB 3.c – 12 m dalla carreggiata a raso	0,0003	0,0001	0,0004

Per effettuare la verifica del modello della sorgente stradale si è proceduto, a partire dalla caratterizzazione della sorgente traffico per tipologia di veicolo, al calcolo del vettore sorgente del periodo di indagine (che non coincide necessariamente con il periodo diurno e/o notturno essendo la sorgente sempre la stessa indipendentemente dal periodo che si considera) ed a confrontarlo con il vettore sorgente ottenuto dalla misura.

Il vettore immissione misurato dall'indagine sperimentale è pari ai seguenti valori:

<b>Vettore immissione misurato</b>			
<b>Postazione</b>	<b>Media <math>a_w</math> max m/s<sup>2</sup></b>	<b>Sigma scarto <math>a_w</math> m/s<sup>2</sup></b>	<b>Vimm <math>a_w,95</math> m/s<sup>2</sup></b>
VIB 3.a – 2 m dalla carreggiata a raso	0,0013	0,0006	0,0024
VIB 3.b – 7 m dalla carreggiata a raso	0,0008	0,0003	0,0013
VIB 3.c – 12 m dalla carreggiata a raso	0,0007	0,0002	0,0011

Il vettore immissione calcolato partendo dalla caratterizzazione della sorgente e considerando la stessa velocità e numero di veicoli è pari a:

<b>Vettore immissione calcolato</b>			
<b>Postazione</b>	<b>Media <math>a_w</math> max m/s<sup>2</sup></b>	<b>Sigma scarto <math>a_w</math> m/s<sup>2</sup></b>	<b>Vimm <math>a_w,95</math> m/s<sup>2</sup></b>
VIB 3.a – 2 m dalla carreggiata a raso	0,0013	0,0004	0,0021
VIB 3.b – 7 m dalla carreggiata a raso	0,0008	0,0002	0,0012
VIB 3.c – 12 m dalla carreggiata a raso	0,0007	0,0002	0,0010

Ne consegue la determinazione del Vettore sorgente nel caso di Vettore Immissione misurato e Vettore Immissione calcolato.

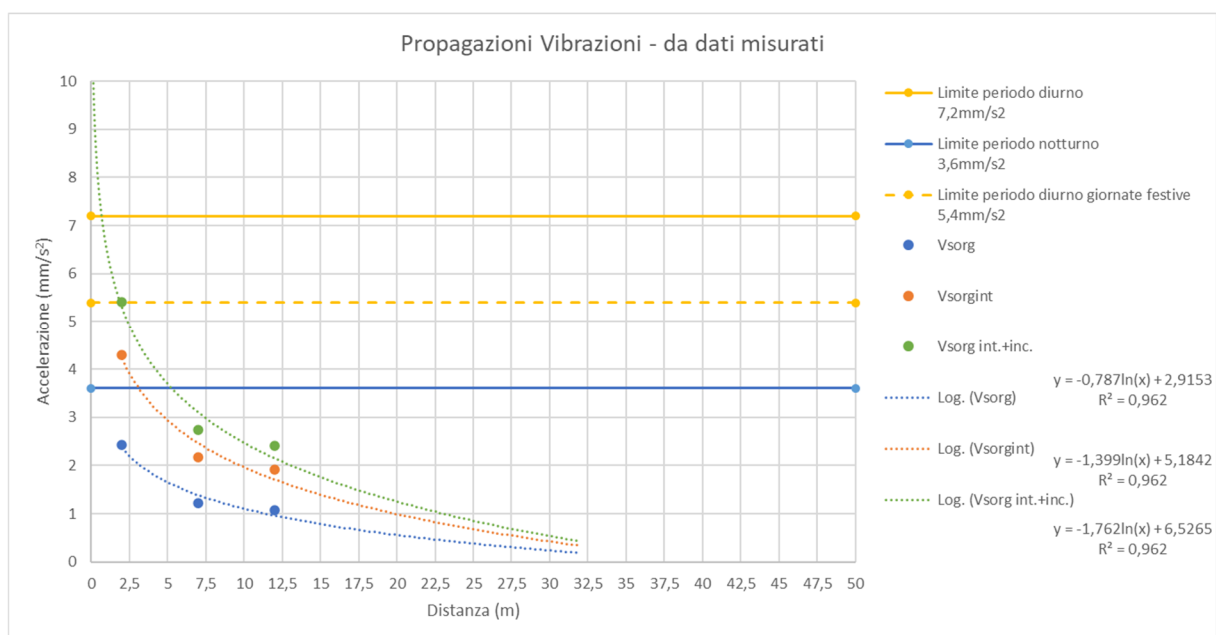
<b>Vettore sorgente</b>			
<b>Postazione</b>	<b>Vettore sorgente calcolato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Vettore sorgente misurato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Differenza tra calcolato e misurato mm/s<sup>2</sup></b>
VIB 3.a – 2 m dalla carreggiata a raso	2,1	2,4	-0,36
VIB 3.b – 7 m dalla carreggiata a raso	1,1	1,2	-0,10
VIB 3.c – 12 m dalla carreggiata a raso	1,0	1,1	-0,10

Dall'analisi del confronto dei valori del Vettore Sorgente calcolato e misurato si riscontra una leggera sottostima del vettore sorgente calcolato a tutte le distanze considerate. In considerazione di quanto evidenziato si procederà ad inserire un fattore correttivo che permetterà di tarare il modello e conseguentemente la funzione di trasferimento.

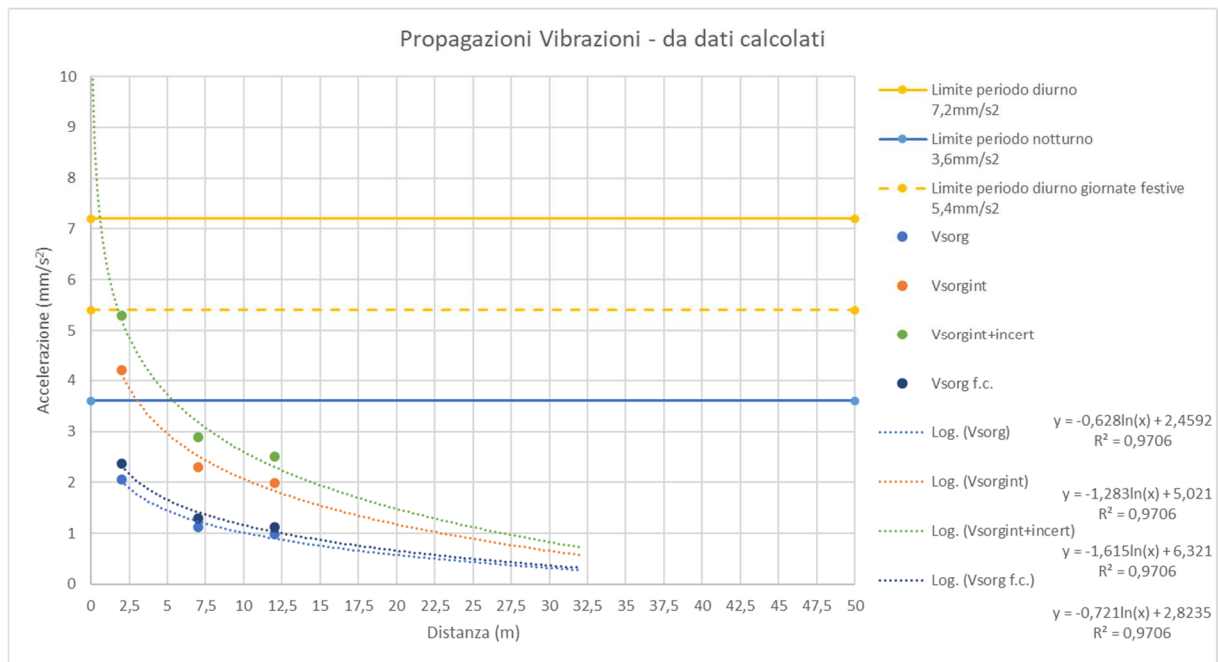
Vettore sorgente – individuazione fattore correttivo					
Postazione	Vettore sorgente calcolato mm/s <sup>2</sup>	Fattore correttivo dB	Vettore sorgente calcolato corretto mm/s <sup>2</sup>	Vettore sorgente misurato mm/s <sup>2</sup>	Differenza tra calcolato e misurato mm/s <sup>2</sup>
VIB 3.a – 2 m dalla carreggiata a raso	2,1	+1,2	2,4	2,4	-0,06
VIB 3.b – 7 m dalla carreggiata a raso	1,1		1,3	1,2	+0,07
VIB 3.c – 12 m dalla carreggiata a raso	1,0		1,1	1,1	+0,05

In base all'applicazione del fattore correttivo si riscontrano uno scostamento tra valori calcolati e valori misurati da -0,06 mm/s<sup>2</sup> a +0,07 mm/s<sup>2</sup>.

Al fine della determinazione della propagazione delle vibrazioni nel terreno e all'interno degli edifici compresa l'incertezza del modello si provvede a determinare la funzione di trasferimento a mezzo di regressione logaritmica determinata sia dai dati misurati che dai dati calcolati ai quali è stato applicato il fattore correttivo.







In base alle funzioni di regressione determinate dai set di dati di input considerati, al fine di valutarne l'eventuale scostamento, si riporta di seguito la tabella di confronto. I dati riportati di seguito fanno riferimento al periodo di acquisizione dei dati sperimentali e non al periodo diurno o notturno; essi hanno lo scopo di verificare lo scostamento delle predizioni usando le regressioni derivanti o da dati misurati o da dati predetti al fine di validare quest'ultimi.

Valutazione della funzione di trasferimento di propagazione delle vibrazioni nel terreno			
Distanza (x) m	funzione di propagazione basata su dati calcolati (+f.c.) $y = -0,628\ln(x) + 2,4592$	funzione di propagazione basata su dati misurati $y = -0,787\ln(x) + 2,9153$	Differenza tra calcolato e misurato mm/s <sup>2</sup>
	Vsorg f.c. - mm/s <sup>2</sup>	Vsorg - mm/s <sup>2</sup>	
2	2,0	2,4	-0,35
7	1,2	1,4	-0,15
12	0,9	1,0	-0,06

Valutazione della funzione di trasferimento di propagazione delle vibrazioni considerando l'amplificazione degli edifici (+5dB) e l'incertezza del modello (+2dB)			
Distanza (x) m	funzione di propagazione basata su dati calcolati $y = -1,615\ln(x) + 6,321$	funzione di propagazione basata su dati misurati $y = -1,762\ln(x) + 6,5265$	Differenza tra calcolato e misurato mm/s <sup>2</sup>
	Vsorg f.c. - mm/s <sup>2</sup>	Vsorg - mm/s <sup>2</sup>	
2	5,2	5,3	-0,10
7	3,2	3,1	0,08
12	2,3	2,1	0,16

Come si riscontra dal confronto fra la predizione ottenuta da dati calcolati a cui è applicato il fattore correttivo e la predizione della funzione di trasferimento ottenuta dai dati misurati si ottiene uno scostamento tra valori calcolati e valori misurati tra -0,06 mm/s<sup>2</sup> e -0,35 mm/s<sup>2</sup> nel caso della

funzione di trasferimento nel terreno; valori tra  $-0,10 \text{ mm/s}^2$  e  $+0,16 \text{ mm/s}^2$  nel caso della funzione di trasferimento che considera l'amplificazione negli edifici e l'incertezza modellistica.

Al fine dell'applicazione del modello definito in precedenza si deve valutare l'eventuale differenza tra il sito di indagine sperimentale, il quale ha permesso la definizione del modello, e l'inserimento del tracciato nel reale contesto geologico. In questo caso dalla valutazione geologica effettuata, ed alla quale si rimanda per maggiori dettagli, non si riscontrano tali singolarità e/o condizioni da far inserire fattori di variazioni del modello per differenze del territorio.

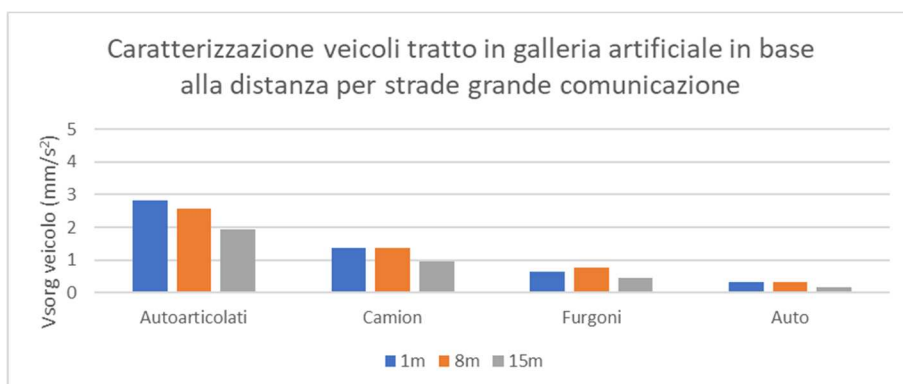
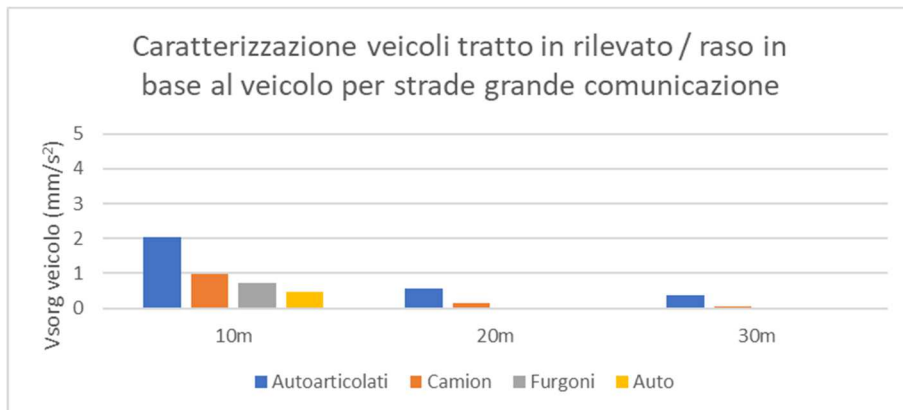
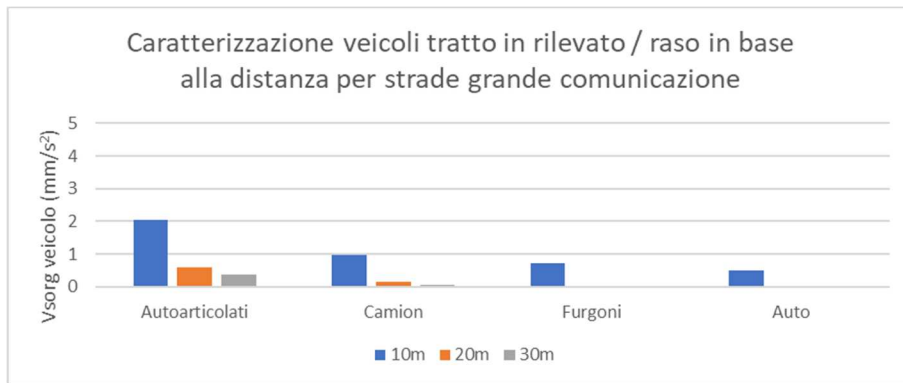
In considerazione di quanto ottenuto si ritiene il modello tarato e cautelativo per la valutazione della propagazione delle vibrazioni in corrispondenza del viadotto.

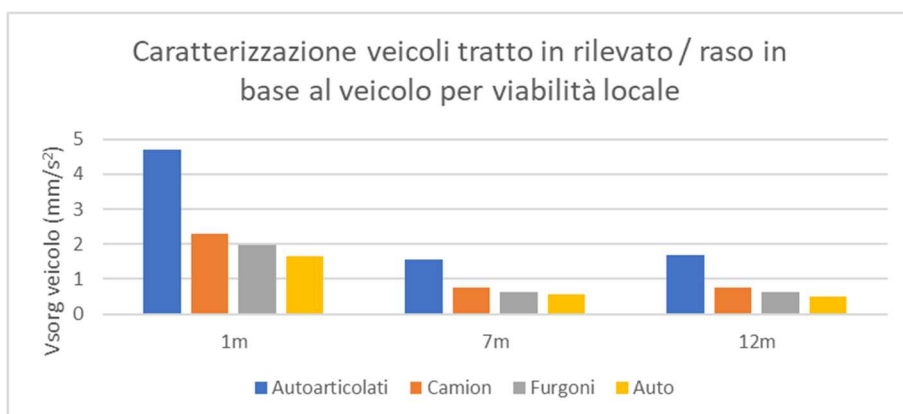
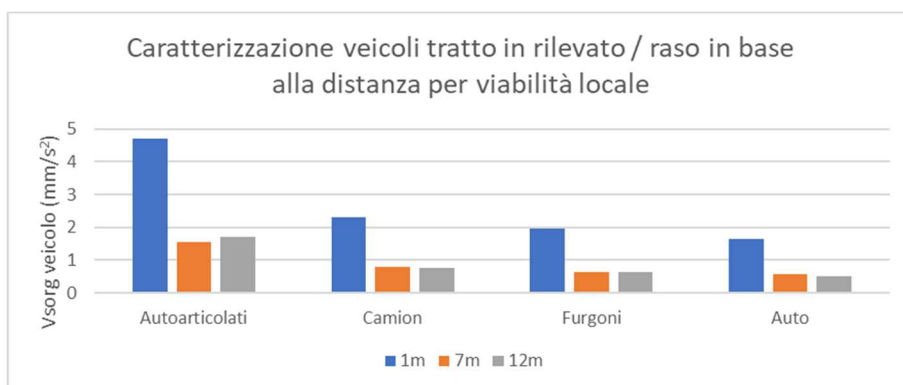
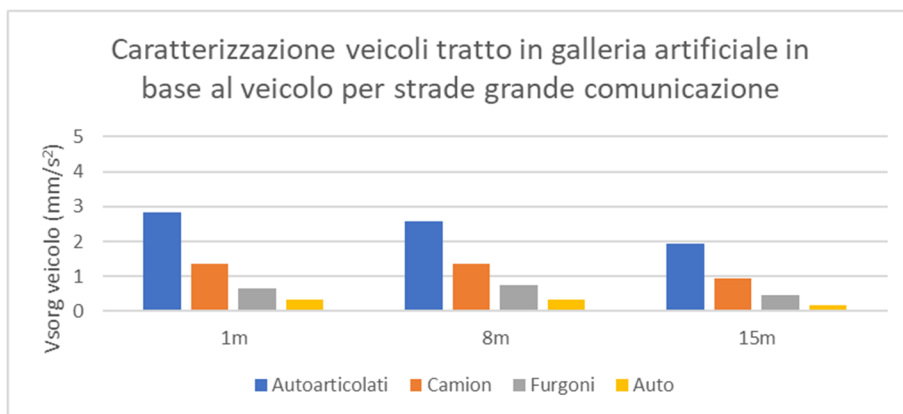
### 6.3. Modello di esercizio di progetto

Per la valutazione sull'opera di progetto si farà riferimento al dettaglio del MdE di progetto. I dati sono ricavati dallo studio del traffico.

Al fine della modellazione delle vibrazioni, per compiere una valutazione cautelativa, sarà considerato sugli archi presenti il traffico definito in base a gruppi in funzione del numero dei veicoli pesanti, in quanto quelli per i quali si determina l'impatto delle vibrazioni. Come evidenziato nella fase di caratterizzazione i veicoli leggeri influenzano solo parzialmente la determinazione del valore immesso delle vibrazioni nella propagazione nel suolo.

Di seguito si riporta la sintesi della caratterizzazione dei veicoli in funzione dalla tipologia dalla quale è riscontrabile quanto esposto: dagli istogrammi è confermata la limita influenza del traffico leggero rispetto a quello pesante.





La parametrizzazione del dato di ingresso nella valutazione, in funzione di gruppi di numero di veicoli pesanti, permettendo di mantenere una stima cautelativa della valutazione, sarà estesa agli archi appartenetene al gruppo individuato.

Vengono di seguito riportati i dati di input utilizzati per l'esercizio stradale di progetto, tipologia di veicoli (leggeri e pesanti), suddivisi per periodo diurno e notturno, con il raggruppamento per gruppi in base al numero di transiti di veicoli pesanti (Sc. B1 2500-2000 e Sc. B2 1000-500: con numero di veicoli pesanti indicati nei range) .

Sc.	strada	descrizione	TGM_leg_d	TGM_pes_d	TGM_leg_n	TGM_pes_n
B1 2500-2000	APL B1-B2	int. Svincolo lentate (dir.A9)	37964	5775	4578	2498
B2 1000-500	APL B2	baruccana - cesano m. (dir.A9)	30890	5429	3724	895

In particolare, lo scenario B1 è relativo alla tratta int. Svincolo lentate (dir.A9) e int. Svincolo lentate (dir.MI), mentre lo scenario B2 sarà applicato su il resto della viabilità della tratta in valutazione.

Sc.	strada	descrizione	TGM_leg_d	TGM_pes_d	TGM_leg_n	TGM_pes_n
B1 2500-2000	APL B1-B2	int. Svincolo lentate (dir.A9)	37964	5775	4578	2498
	APL B1-B2	int. Svincolo lentate (dir.MI)	37964	5775	4578	2498
B2 1000-500	APL B2	baruccana - cesano m. (dir.A9)	30890	5429	3724	895
	APL B2	baruccana - cesano m. (dir.MI)	30890	5429	3724	895
	APL B2	meda - baruccana (dir.A9)	26655	4867	3213	802
	APL B2	meda - baruccana (dir.MI)	26655	4867	3213	802
	APL B2	lentate sud - meda (dir.A9)	25399	4624	3062	763
	APL B2	lentate sud - meda (dir.MI)	25399	4624	3062	763
	svincolo meda	ramo est	21828	3718	2632	613
	APL B2	lentate nord - lentate sud (dir.A9)	19059	3546	2298	585
	APL B2	lentate nord - lentate sud (dir.MI)	19059	3546	2298	585
	superstrada milano-medea	bovisio m. - desio (dir.A9)	17783	2640	2144	435
	superstrada milano-medea	bovisio m. - desio (dir.MI)	17783	2640	2144	435
	TRCO06	da svincolo lentate a rotatoria	12354	2328	1489	384
	TRCO06	da rotatoria a novedratese	9516	1828	1147	301
	svincolo meda	ramo ovest	10398	1734	1254	286
	interconn. APL-TRCO06	da APL-B2 dir.TRCO06	6516	1281	786	211
	svincolo lentate	rampa svincolo lentate (verso MI)	7018	1172	846	193
	svincolo baruccana	svincolo baruccana - ovest	7819	1031	943	170
	svincolo meda	uscita su v.le tre venezie (dir.S)	5769	1000	696	165
	svincolo lentate	rampa svincolo lentate (da MI)	5647	968	681	160
	interconn. APL-TRCO06	da APL-B1 dir.TRCO06	4657	937	561	155
	svincolo meda	uscita su v.le tre venezie (dir.N)	6829	906	823	149
	svincolo lentate	rampa svincolo lentate (da MI)	5918	890	714	147
	interconn. APL-TRCO06	da TRCO06 dir.Varese	4574	812	552	134
	svincolo meda	ingresso dir.nord	5498	781	663	129
	svincolo baruccana	svincolo baruccana - ovest	5538	766	668	126
	svincolo lentate	rampa svincolo lentate (da MI)	4779	719	576	118
	svincolo baruccana	baruccana uscita CO	4317	672	520	111
	svincolo meda	coll. Via vignazzola	2729	469	329	77
	rampa TRCO06	nord rotatoria dir. Novedratese	2471	469	298	77
	interconn. APL-TRCO06	da TRCO06 dir.Milano	2891	453	349	75
	svincolo baruccana	baruccana ingresso MI	4141	421	499	70
	svincolo baruccana	svincolo baruccana - ovest	4141	406	499	67
svincolo baruccana	svincolo baruccana - est	3285	360	396	59	

Sc.	strada	descrizione	TGM_leg_d	TGM_pes_d	TGM_leg_n	TGM_pes_n
	svincolo meda	coll. Via della roggia	1711	234	206	39
	svincolo meda	uscita su via della roggia (dir.N)	1805	234	218	39
	svincolo meda	connessione via m.polo	800	172	97	28
	svincolo meda	connessione via m.polo	774	172	93	28
	rampa TRCO06	nord rotatoria dir. APL	787	141	95	23
	svincolo meda	via senofonte	95	0	11	0

In merito alla viabilità locale si farà riferimento ai seguenti dati di traffico di progetto. Anche per la viabilità locale i gruppi sono definiti in funzione del numero di veicoli pesanti.

Sc.	strada	descrizione	TGM_le_g_d	TGM_pe_s_d	TGM_le_g_n	TGM_pe_s_n
BL1 600-250	SP32-novedratese	dopo TRCO06	19399	3577	2339	590
BL2 <250	affiancam. TRCO06	via f.lli rosselli - rotatoria TRCO06	6679	1328	805	219

Di seguito l'identificazione dei raggruppamenti delle viabilità in funzione di veicoli pesanti.

sc	strada	descrizione	TGM_leg_d	TGM_pes_d	TGM_leg_n	TGM_pes_n
BL1 600-250	SP32-novedratese	dopo TRCO06	19399	3577	2339	590
	SS35 dei giovì	a nord di TRCO06 (cermenate)	18883	3359	2277	554
	via Cadorna (Meda)	a est svincolo	18788	3093	2265	510
	SS35 dei giovì	da novedratese a viab. Copreno	15693	2937	1892	484
	affiancam. TRCO06	SS35 - rotatoria TRCO06	14511	2812	1750	464
	SS35 dei giovì	da viab. Copreno verso sud	14959	2483	1804	410
	SS35 dei giovì	da rotatoria TRCO06 a novedratese	11390	2172	1373	358
	SS35 dei giovì	barlassina-svincolo lentate	12014	2125	1448	350
	SP134 - c.so Isonzo (Seveso)	a ovest di MI-MEDA	16942	2671	2042	441
	via Cadorna (Meda)	a ovest svincolo	11403	1906	1375	314
	SP32-novedratese	da SS35 a TRCO06	4306	622	519	269
	SS35 dei giovì	barlassina	7249	1593	874	263
	via f.lli rosselli	via f.lli rosselli	7548	1547	910	255
viab. Copreno	viab. Copreno (a nord di A36)	2471	1515	298	250	
BL2 <250	affiancam. TRCO06	via f.lli rosselli - rotatoria TRCO06	6679	1328	805	219
	coll.SP152-SS35	via zara	6530	1313	787	216
	via S.Carlo (Cesano M.)	via S.Carlo est	9163	1203	1105	198
	via Vignazzola (Meda)	a ovest di MI-MEDA	6842	1156	825	191
	SP118 Seregno-Cogliate	a est di MI-MEDA	5783	1125	697	185
	affiancam. TRCO06	via per carimate	5553	953	669	157
	coll.SP152-SS35	via fara	4900	953	591	157
	via S.Carlo (Cesano M.)	via S.Carlo ovest	5566	859	671	142

sc	strada	descrizione	TGM_leg _d	TGM_pes _d	TGM_leg _n	TGM_pes _n
	via Milano (Meda)	via milano	5240	828	632	136
	via Vignazzola (Meda)	a est di MI-MEDA	3435	640	414	106
	coll.SP152-SP118-SS35	via U.Foscolo	2891	610	349	100
	SP118 Seregno-Cogliate	a ovest di MI-MEDA	2946	578	355	95
	SP134 - c.so Isonzo (Seveso)	a est di MI-MEDA	5145	547	620	90
	coll.SP152-SP118-SS35	via Don Carlo Gnocchi	2484	469	300	77
	coll.SP152-SP118-SS35	via Aldo Moro	2688	391	324	64
	viab. Copreno	viab. Copreno (a sud di A36)	1588	375	192	62
	via pastrengo	via pastrengo	1751	360	211	59
	via G.Garibaldi	via G.Garibaldi	3584	343	432	57
			950	250	115	41
	coll. Copreno	tra via f.lli rosselli e copreno	869	187	105	31
	via Tre Venezie (Meda)	via tre venezie	815	172	98	28
	via Marco Polo (Meda)	via m.polo	800	172	97	28
	SP152 Birago-Ravello P.	a ovest di SS35	122	15	15	3
	SP152 Birago-Ravello P.	a est di SS35	163	15	20	3

## 6.4. Funzione di propagazione delle vibrazioni in stato di progetto

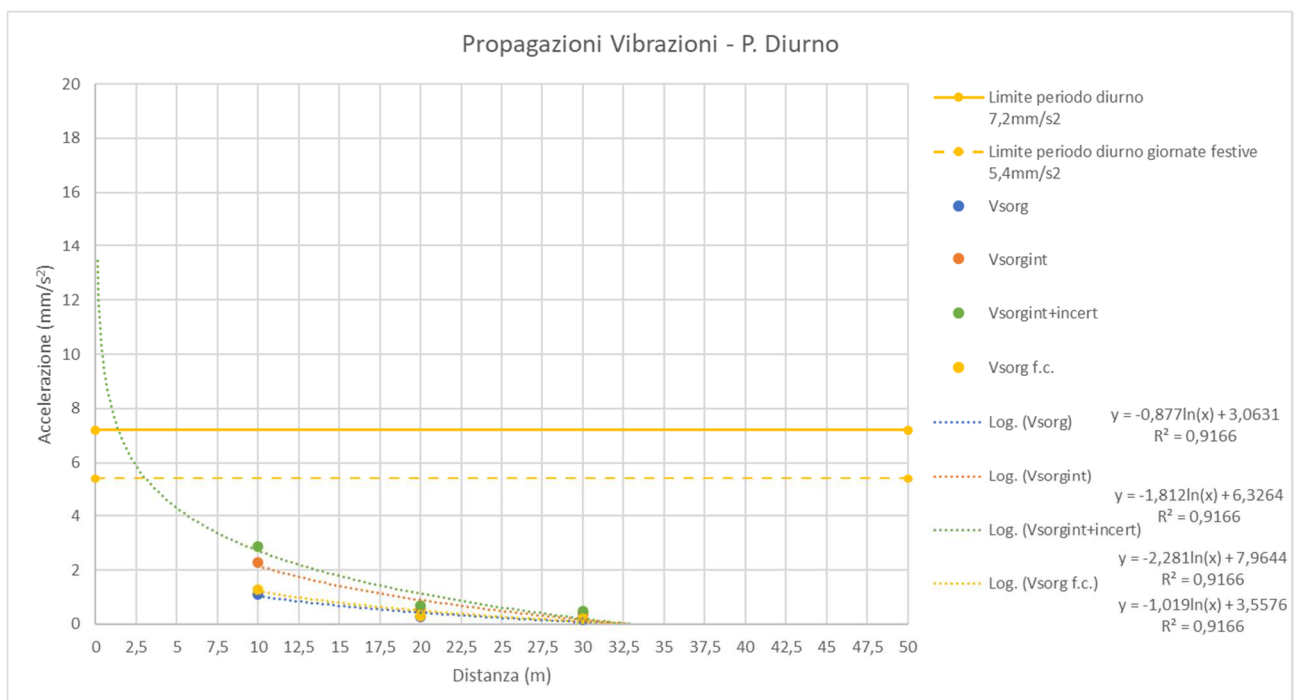
La modellazione previsionale della propagazione delle vibrazioni ha permesso la definizione di una funzione di trasferimento dalla quale è possibile valutare la variazione delle vibrazioni indotte dal traffico stradale in relazione alla distanza dalla sorgente.

### 6.4.1. Funzione di propagazione sezione a raso ed in rilevato (Sc.B1 2500-2000)

Di seguito la modellizzazione per i tratti a raso ed in rilevato (o sezioni assimilabili) in periodo diurno e notturno.

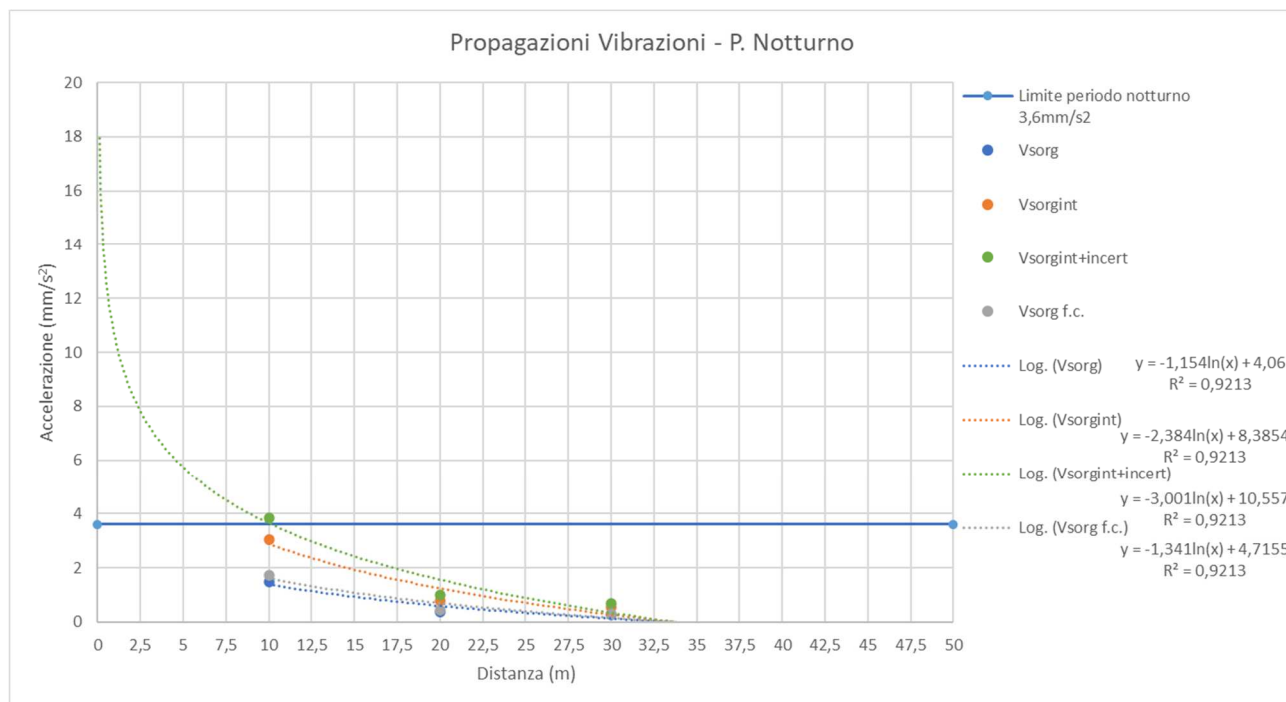
Periodo Diurno - tratti a raso ed in rilevato				
Postaz. (m)	Vsorg mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c. mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ amplificazione interna mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ ampl. +incertezza modello mm/s <sup>2</sup>
10	1,1	1,3	2,3	2,9
20	0,3	0,3	0,6	0,7
30	0,2	0,2	0,4	0,5

Periodo Notturno - tratti a raso ed in rilevato				
Postaz. (m)	Vsorg mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c. mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ amplificazione interna mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ ampl. +incertezza modello mm/s <sup>2</sup>
10	1,5	1,7	3,1	3,9
20	0,4	0,5	0,8	1,0
30	0,3	0,3	0,6	0,7





La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo diurno, comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello, risulta essere  $y = -2,281 \ln(x) + 7,9644$ .



La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo notturno, comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello, risulta essere  $y = -3,001 \ln(x) + 10,557$

Inoltre, è stata predisposta una tabella, con impostato un passo di 2,5 metri, al fine di proporre la variazione delle vibrazioni immesse. Le celle se evidenziate indicano il superamento o del limite diurno (7,2 mm/s<sup>2</sup>) o del limite notturno (3,6 mm/s<sup>2</sup>) per la destinazione d'uso abitazione.

Distanza m	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Diurno mm/s <sup>2</sup>	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Notturno mm/s <sup>2</sup>
1	8,0	10,6
2,5	5,9	7,8
5	4,3	5,7
7,5	3,4	4,5
10	2,7	3,6
12,5	2,2	3,0
15	1,8	2,4
17,5	1,4	2,0
20	1,1	1,6
22,5	0,9	1,2
25	0,6	0,9
27,5	0,4	0,6
30	0,2	0,4

La distanza limite per il rispetto del limite notturno risulta essere circa 10m. Per il periodo diurno il limite è rispettato a circa 1,5m.

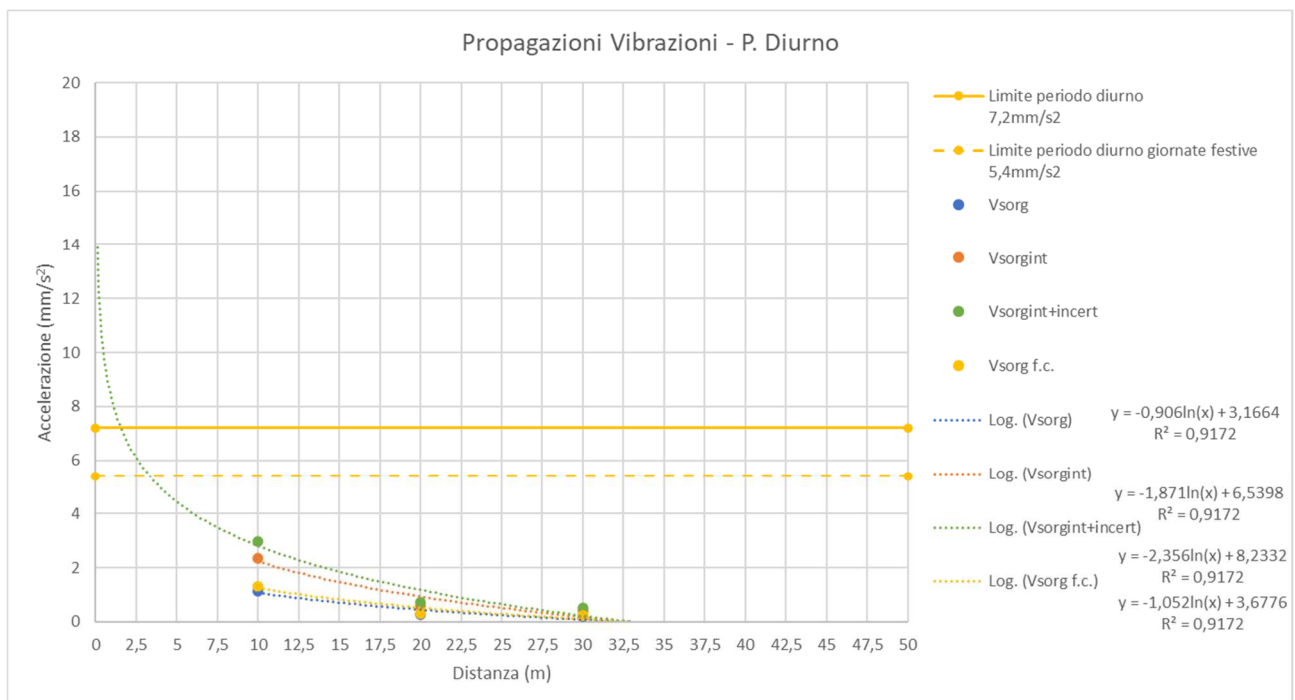
Il valore del vettore sorgente è definito all'interno dell'edificio e considera l'amplificazione delle vibrazioni a causa della vibrazione della struttura e la somma dell'incertezza associata al modello.

### 6.4.2. Funzione di propagazione sezione a raso ed in rilevato (Sc.B2 1000-500)

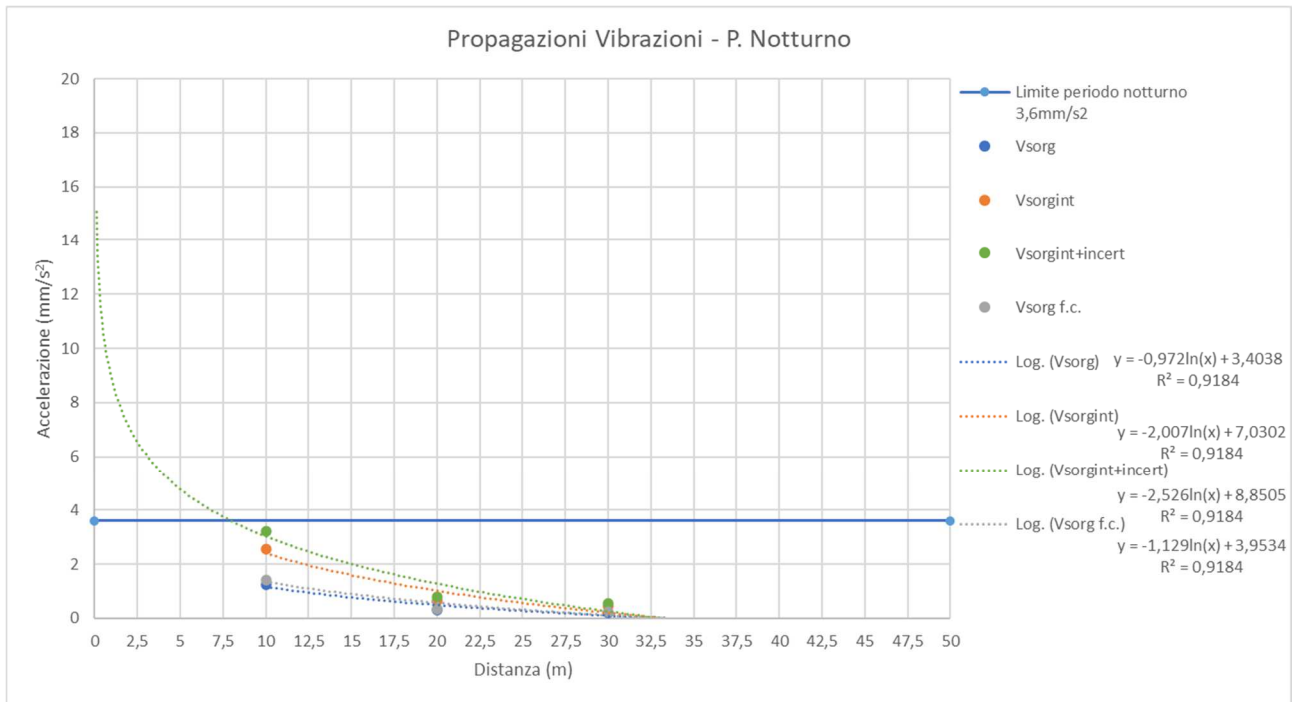
Di seguito la modellizzazione per i tratti a raso ed in rilevato (o sezioni assimilabili) in periodo diurno e notturno.

Periodo Diurno - tratti a raso ed in rilevato				
Postaz. (m)	Vsorg mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c. mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ amplificazione interna mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ ampl. +incertezza modello mm/s <sup>2</sup>
10	1,1	1,3	2,4	3,0
20	0,3	0,3	0,6	0,7
30	0,2	0,2	0,4	0,5

Periodo Notturno - tratti a raso ed in rilevato				
Postaz. (m)	Vsorg mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c. mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ amplificazione interna mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ ampl. +incertezza modello mm/s <sup>2</sup>
10	1,2	1,4	2,5	3,2
20	0,3	0,4	0,6	0,8
30	0,2	0,2	0,4	0,6



La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo diurno, comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello, risulta essere  $y = -2,356\ln(x) + 8,2332$



La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo notturno, comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello, risulta essere  $y = -2,526\ln(x) + 8,8505$

Inoltre, è stata predisposta una tabella, con impostato un passo di 2,5 metri, al fine di proporre la variazione delle vibrazioni immesse. Le celle se evidenziate indicano il superamento o del limite diurno (7,2 mm/s<sup>2</sup>) o del limite notturno (3,6 mm/s<sup>2</sup>) per la destinazione d'uso abitazione.

Distanza m	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Diurno mm/s <sup>2</sup>	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Notturno mm/s <sup>2</sup>
1	8,2	8,9
2,5	6,1	6,5
5	4,4	4,8
7,5	3,5	3,8
10	2,8	3,0
12,5	2,3	2,5
15	1,9	2,0
17,5	1,5	1,6
20	1,2	1,3
22,5	0,9	1,0
25	0,6	0,7
27,5	0,4	0,5
30	0,2	0,3

La distanza limite per il rispetto del limite notturno risulta essere circa 8m. Per il periodo diurno il limite è rispettato a circa 1,5m.

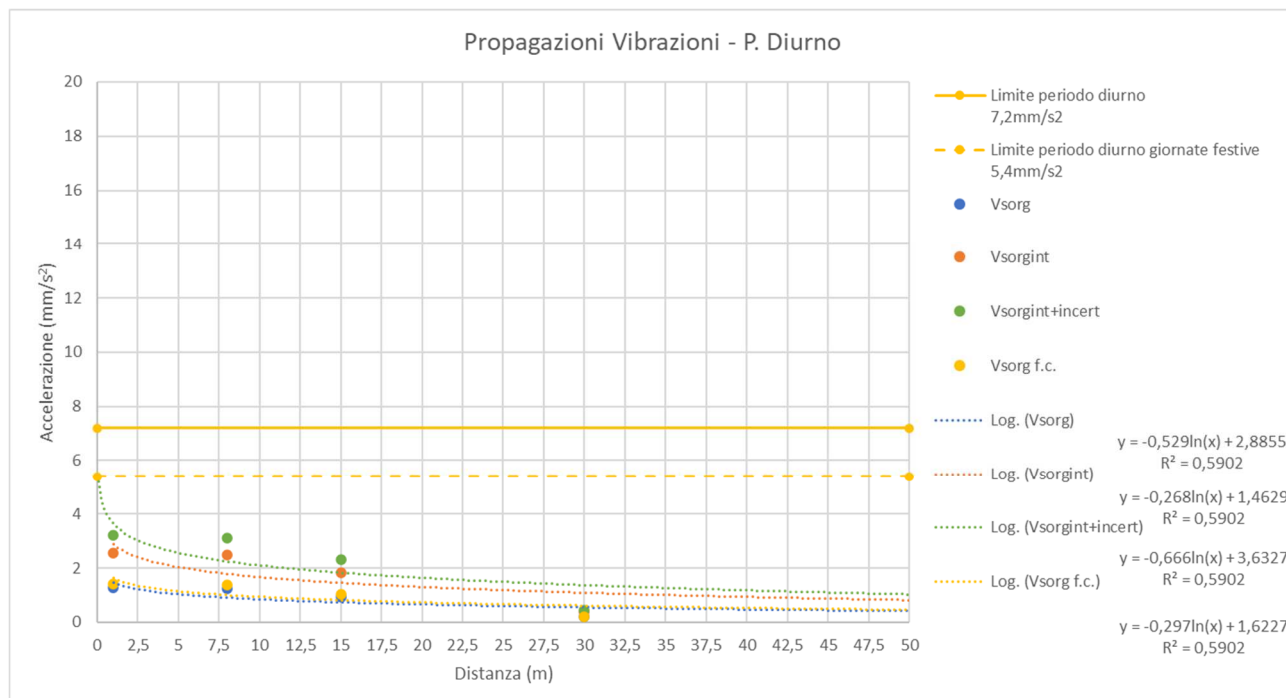
Il valore del vettore sorgente è definito all'interno dell'edificio e considera l'amplificazione delle vibrazioni a causa della vibrazione della struttura e la somma dell'incertezza associata al modello.

### 6.4.3. Funzione di propagazione sezione in galleria e in trincea (Sc.B1 2500-2000)

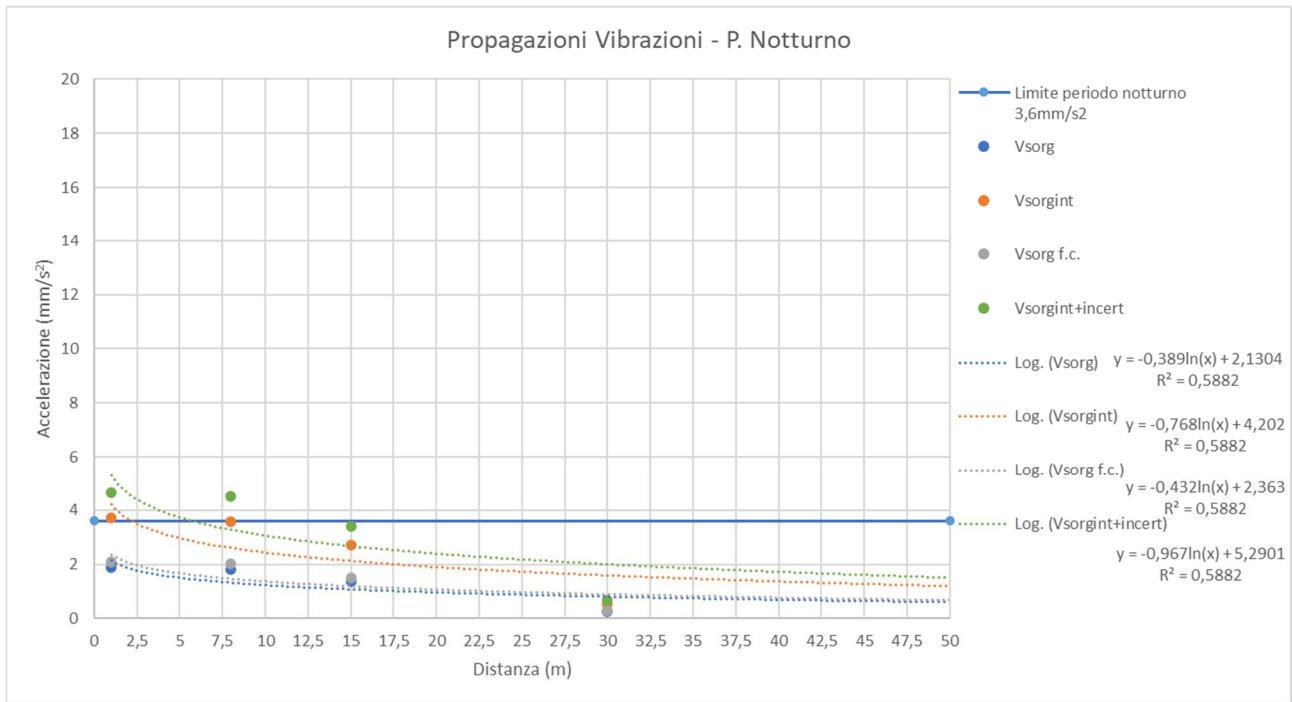
Di seguito la modellizzazione per i tratti in galleria ed in trincea in periodo diurno e notturno.

Periodo Diurno - tratti in galleria e trincea				
Postaz. (m)	Vsorg mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c. mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ amplificazione interna mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ ampl. +incertezza modello mm/s <sup>2</sup>
1	1,3	1,4	2,5	3,2
8	1,3	1,4	2,5	3,1
15	0,9	1,0	1,8	2,3
30	0,2	0,2	0,4	0,5

Periodo Notturno - tratti in galleria e trincea				
Postaz. (m)	Vsorg mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c. mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ amplificazione interna mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ ampl. +incertezza modello mm/s <sup>2</sup>
1	1,9	2,1	3,7	4,7
8	1,8	2,0	3,6	4,5
15	1,4	1,5	2,7	3,4
30	0,3	0,3	0,5	0,7



La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo diurno, comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello, risulta essere  $y = -0,666\ln(x) + 3,6327$



La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo notturno, comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello, risulta essere  $y = -0,967\ln(x) + 5,2901$

Inoltre, è stata predisposta una tabella, con impostato un passo di 2,5 metri, al fine di proporre la variazione delle vibrazioni immesse. Le celle se evidenziate indicano il superamento o del limite diurno ( $7,2 \text{ mm/s}^2$ ) o del limite notturno ( $3,6 \text{ mm/s}^2$ ) per la destinazione d'uso abitazione.

Distanza m	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Diurno $\text{mm/s}^2$	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Notturno $\text{mm/s}^2$
1	3,6	5,3
2,5	3,0	4,4
5	2,6	3,7
7,5	2,3	3,3
10	2,1	3,1
12,5	2,0	2,8
15	1,8	2,7
17,5	1,7	2,5
20	1,6	2,4
22,5	1,6	2,3
25	1,5	2,2
27,5	1,4	2,1
30	1,4	2,0

La distanza limite per il rispetto del limite notturno risulta essere circa 6m. Per il periodo diurno il limite è sempre rispettato.

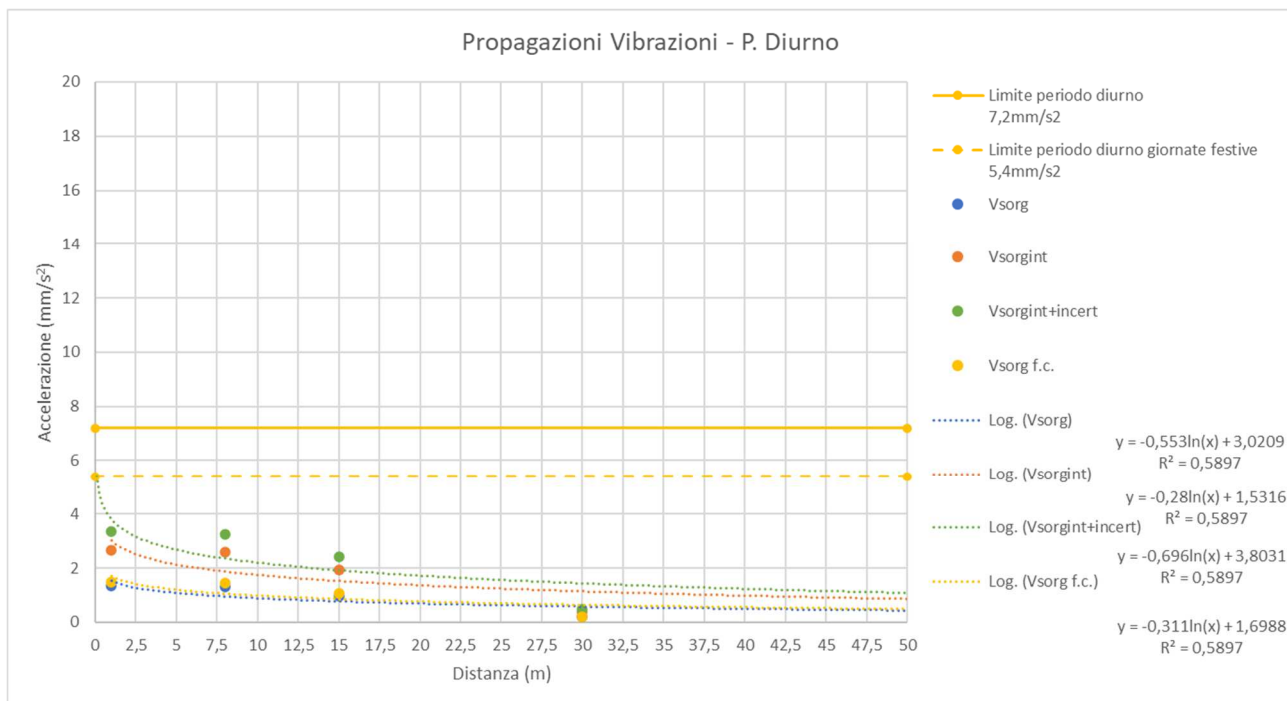
Il valore del vettore sorgente è definito all'interno dell'edificio e considera l'amplificazione delle vibrazioni a causa della vibrazione della struttura e la somma dell'incertezza associata al modello.

#### 6.4.4. Funzione di propagazione sezione in galleria e in trincea (Sc.B2 1000-500)

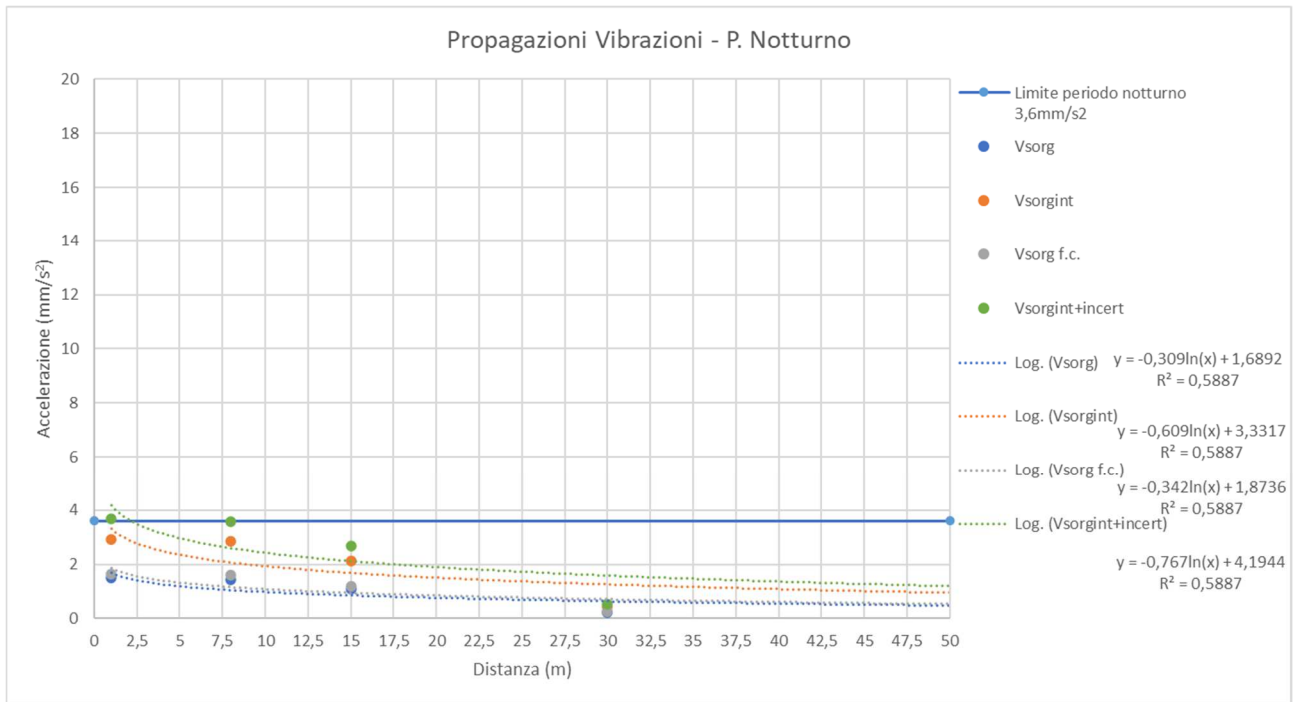
Di seguito la modellizzazione per i tratti in galleria ed in trincea in periodo diurno e notturno.

Periodo Diurno - tratti in galleria e trincea				
Postaz. (m)	Vsorg mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c. mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ amplificazione interna mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ ampl. +incertezza modello mm/s <sup>2</sup>
1	1,3	1,5	2,7	3,4
8	1,3	1,5	2,6	3,3
15	1,0	1,1	1,9	2,4
30	0,2	0,2	0,4	0,5

Periodo Notturno - tratti in galleria e trincea				
Postaz. (m)	Vsorg mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c. mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ amplificazione interna mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ ampl. +incertezza modello mm/s <sup>2</sup>
1	1,5	1,7	2,9	3,7
8	1,4	1,6	2,9	3,6
15	1,1	1,2	2,1	2,7
30	0,2	0,2	0,4	0,5



La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo diurno, comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello, risulta essere  $y = -0,696\ln(x) + 3,8031$



La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo notturno, comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello, risulta essere  $y = -0,767\ln(x) + 4,1944$

Inoltre, è stata predisposta una tabella, con impostato un passo di 2,5 metri, al fine di proporre la variazione delle vibrazioni immesse. Le celle se evidenziate indicano il superamento o del limite diurno (7,2 mm/s<sup>2</sup>) o del limite notturno (3,6 mm/s<sup>2</sup>) per la destinazione d'uso abitazione.

Distanza m	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Diurno mm/s <sup>2</sup>	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Notturno mm/s <sup>2</sup>
1	3,8	4,2
2,5	3,2	3,5
5	2,7	3,0
7,5	2,4	2,6
10	2,2	2,4
12,5	2,0	2,3
15	1,9	2,1
17,5	1,8	2,0
20	1,7	1,9
22,5	1,6	1,8
25	1,6	1,7
27,5	1,5	1,7
30	1,4	1,6

La distanza limite per il rispetto del limite notturno risulta essere circa 2m. Per il periodo diurno il limite è sempre rispettato.

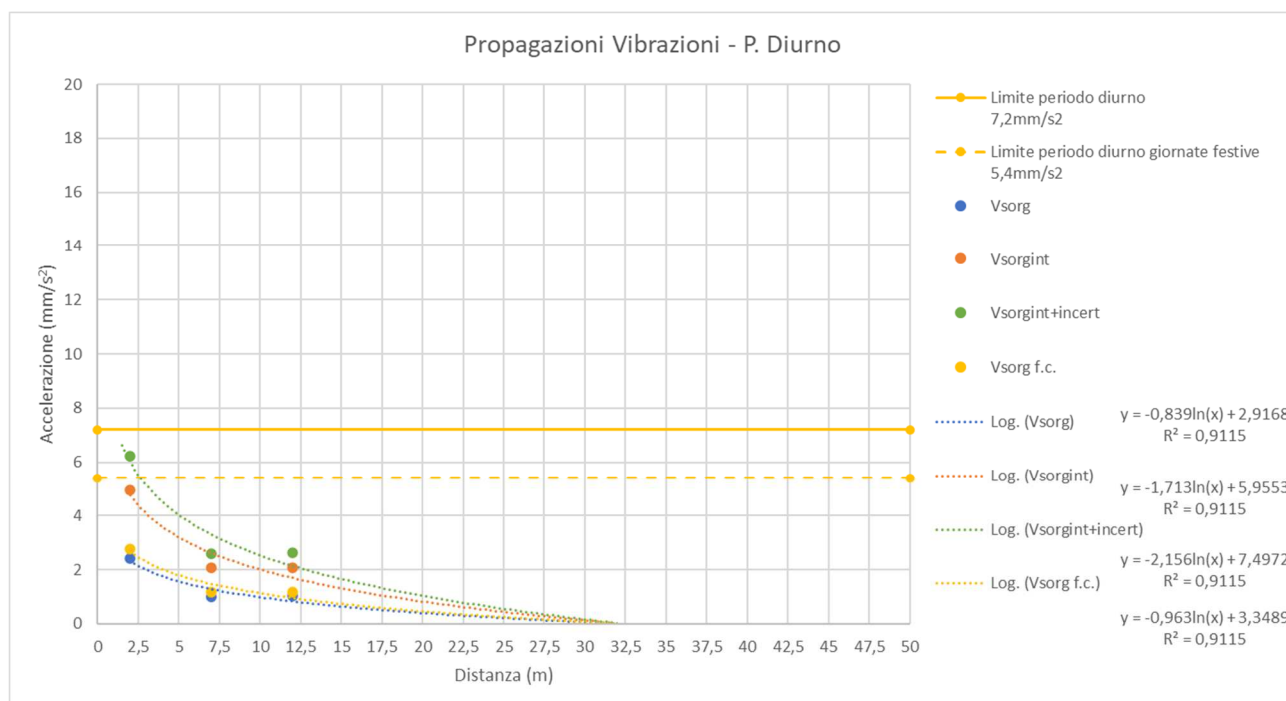
Il valore del vettore sorgente è definito all'interno dell'edificio e considera l'amplificazione delle vibrazioni a causa della vibrazione della struttura e la somma dell'incertezza associata al modello.

### 6.4.5. Funzione di propagazione sezione a raso per la viabilità locale (Sc.BL1 600-250)

Di seguito la modellizzazione per i tratti a raso ed in rilevato (o sezioni assimilabili) in periodo diurno e notturno in riferimento alla viabilità locale prossima alla strada di grande comunicazione.

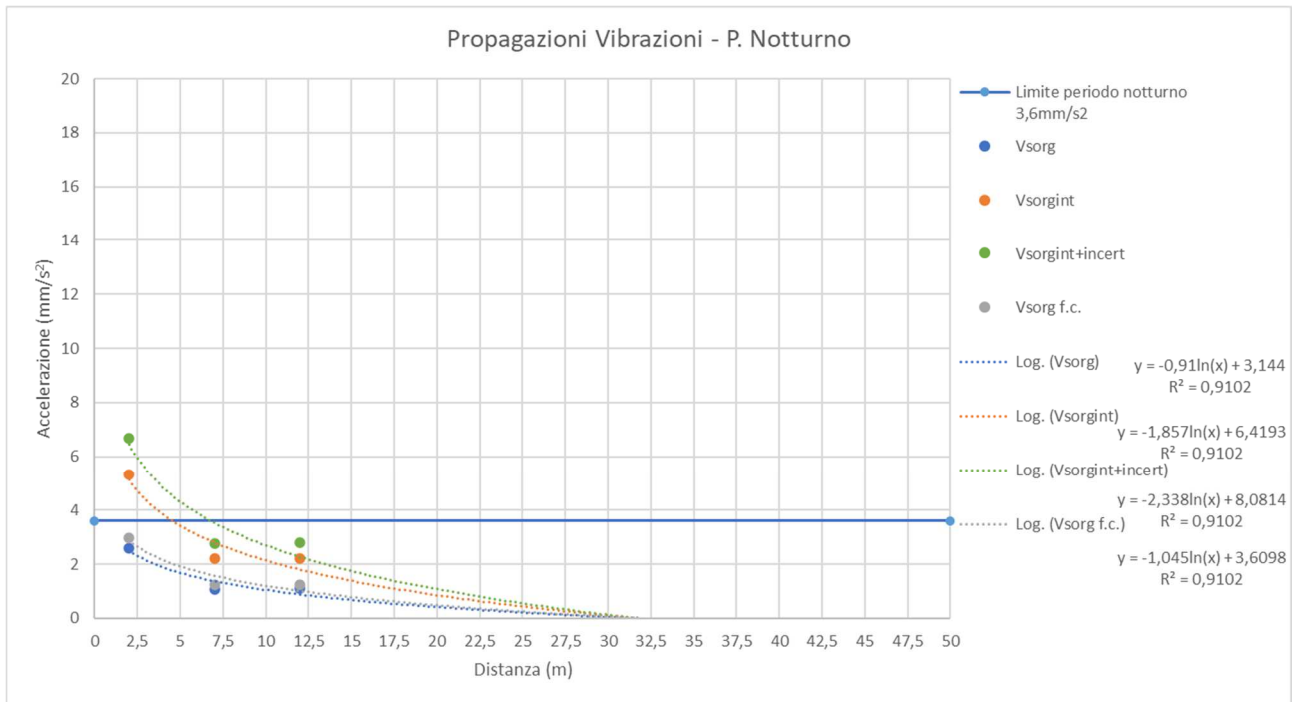
Periodo Diurno - tratti a raso ed in rilevato				
Postaz. (m)	Vsorg mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c. mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ amplificazione interna mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ ampl. +incertezza modello mm/s <sup>2</sup>
2	2,4	2,8	4,9	6,2
7	1,0	1,2	2,1	2,6
12	1,0	1,2	2,1	2,6

Periodo Notturno - tratti a raso ed in rilevato				
Postaz. (m)	Vsorg mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c. mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ amplificazione interna mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ ampl. +incertezza modello mm/s <sup>2</sup>
2	2,6	3,0	5,3	6,7
7	1,1	1,2	2,2	2,8
12	1,1	1,3	2,2	2,8



La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo diurno, comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello, risulta essere  $y = -2,156\ln(x) + 7,4972$





La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo notturno, comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello, risulta essere  $y = -2,338 \ln(x) + 8,0814$

Inoltre, è stata predisposta una tabella, con impostato un passo di 2,5 metri, al fine di proporre la variazione delle vibrazioni immesse. Le celle se evidenziate indicano il superamento o del limite diurno (7,2 mm/s²) o del limite notturno (3,6 mm/s²) per la destinazione d'uso abitazione.

Distanza m	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Diurno mm/s²	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Notturno mm/s²
1	7,5	8,1
2,5	5,5	5,9
5	4,0	4,3
7,5	3,2	3,4
10	2,5	2,7
12,5	2,1	2,2
15	1,7	1,7
17,5	1,3	1,4
20	1,0	1,1
22,5	0,8	0,8
25	0,6	0,6
27,5	0,4	0,3
30	0,2	0,1

La distanza limite per il rispetto del limite notturno risulta essere circa 7m. Per il periodo diurno il limite è rispettato a circa 1,5m.

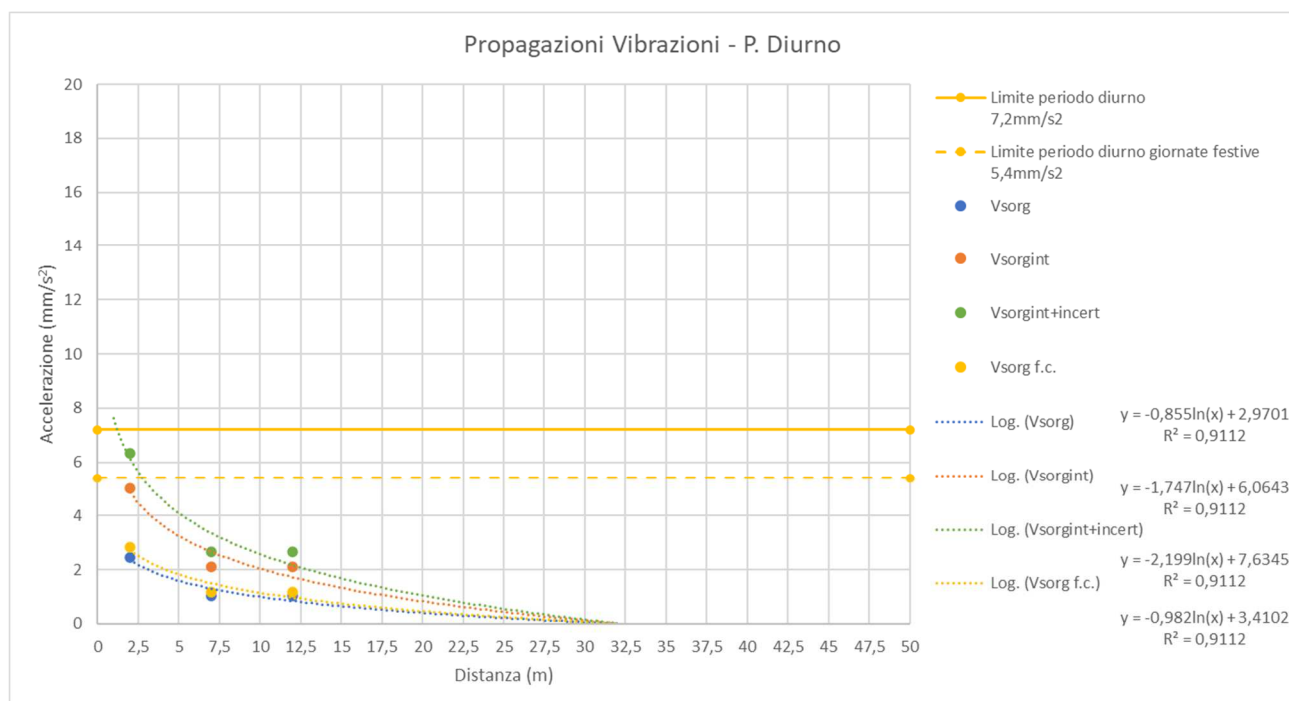
Il valore del vettore sorgente è definito all'interno dell'edificio e considera l'amplificazione delle vibrazioni a causa della vibrazione della struttura e la somma dell'incertezza associata al modello.

### 6.4.6. Funzione di propagazione sezione a raso per la viabilità locale (Sc.BL2 <250)

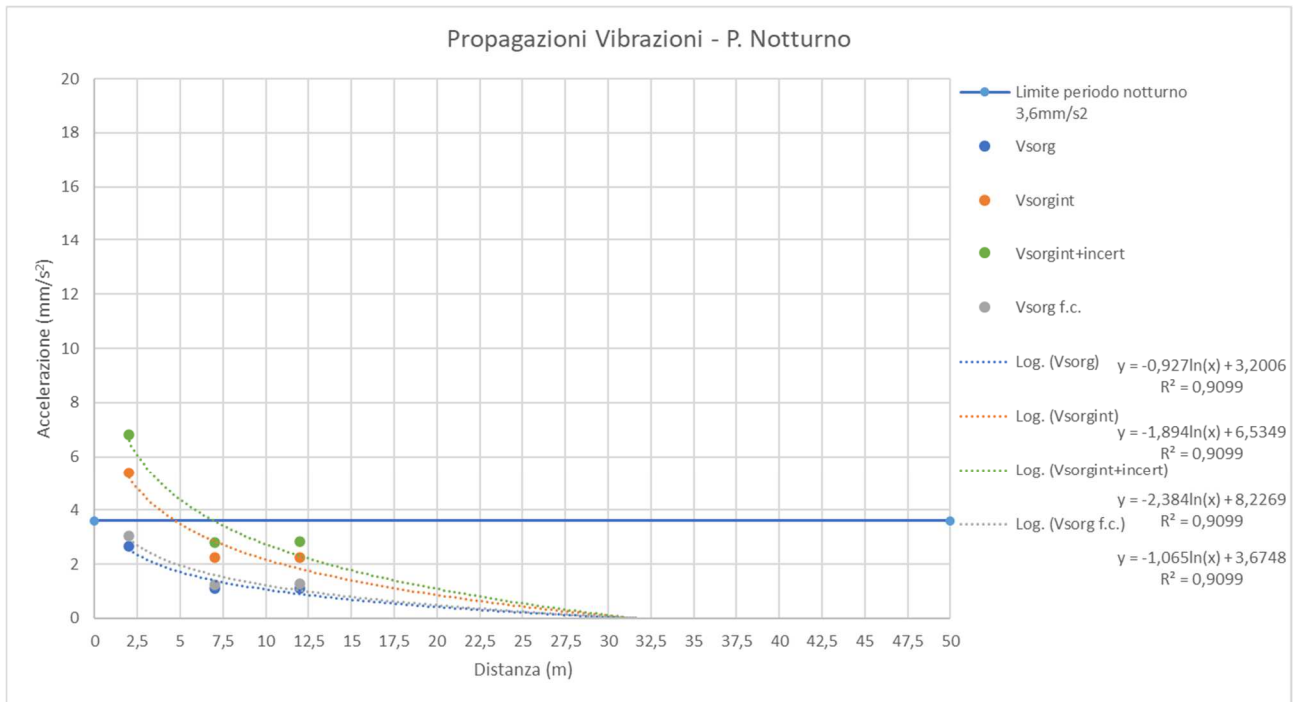
Di seguito la modellizzazione per i tratti a raso ed in rilevato (o sezioni assimilabili) in periodo diurno e notturno in riferimento alla viabilità locale prossima alla strada di grande comunicazione.

Periodo Diurno - tratti a raso ed in rilevato				
Postaz. (m)	Vsorg mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c. mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ amplificazione interna mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ ampl. +incertezza modello mm/s <sup>2</sup>
2	2,5	2,8	5,0	6,3
7	1,0	1,2	2,1	2,6
12	1,0	1,2	2,1	2,7

Periodo Notturno - tratti a raso ed in rilevato				
Postaz. (m)	Vsorg mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c. mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ amplificazione interna mm/s <sup>2</sup>	Vsorg f.c.+ ampl. +incertezza modello mm/s <sup>2</sup>
2	2,6	3,0	5,4	6,8
7	1,1	1,3	2,2	2,8
12	1,1	1,3	2,3	2,8



La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo diurno, comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello, risulta essere  $y = -2,199\ln(x) + 7,6345$



La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo notturno, comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello, risulta essere  $y = -2,384 \ln(x) + 8,2269$

Inoltre, è stata predisposta una tabella, con impostato un passo di 2,5 metri, al fine di proporre la variazione delle vibrazioni immesse. Le celle se evidenziate indicano il superamento o del limite diurno ( $7,2 \text{ mm/s}^2$ ) o del limite notturno ( $3,6 \text{ mm/s}^2$ ) per la destinazione d'uso abitazione.

Distanza m	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Diurno $\text{mm/s}^2$	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Notturno $\text{mm/s}^2$
1	7,6	8,2
2,5	5,6	6,0
5	4,1	4,4
7,5	3,2	3,4
10	2,6	2,7
12,5	2,1	2,2
15	1,7	1,8
17,5	1,3	1,4
20	1,0	1,1
22,5	0,8	0,8
25	0,6	0,6
27,5	0,3	0,3
30	0,2	0,1

La distanza limite per il rispetto del limite notturno risulta essere circa 7m. Per il periodo diurno il limite è rispettato a circa 1,5m.

Il valore del vettore sorgente è definito all'interno dell'edificio e considera l'amplificazione delle vibrazioni a causa della vibrazione della struttura e la somma dell'incertezza associata al modello.

## 7. PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO

L'individuazione delle criticità, le quali si potrebbero verificare con la realizzazione del progetto, ha reso indispensabile determinare preventivamente i criteri di valutazione della sensibilità del territorio. A tale scopo è stato utilizzato come riferimento il censimento dei ricettori acustici per valutare la loro posizione in funzione del tracciato in progetto. Per quanto riguarda la valutazione della propagazione delle vibrazioni è stato realizzato un modello realizzato in riferimento alla norma UNI 9614:2017.

Applicando il modello di calcolo e le funzioni di trasferimento sperimentali, ottenute in funzione sia della tipologia di sezione stradale che dei transiti previsti nel modello di esercizio, si rileva che i valori di riferimento di cui alla norma UNI 9614:2017 sono generalmente rispettati già a distanze molto limitate dalla carreggiata stradale e quindi, in generale, per tutti i ricettori posti in prossimità del tracciato si riscontrano situazioni di conformità ai limiti della UNI 9614:2017. Considerando tipologie edilizie e attraversamenti litologici tipici dell'area in esame rispetto a quella delle indagini sperimentale per caratterizzare il modello, si è giunti al calcolo della distanza dalla sorgente a cui il livello di accelerazione ponderato risulta inferiore ai valori di riferimento indicati dalla normativa UNI 9614:2017 per i ricettori nel periodo diurno e notturno lungo il tracciato.

In assenza però di dati precisi per ciascun edificio analizzato (terreno, fondazioni, strutture, disposizione interna dei vani) le valutazioni previsionali possono risentire di variazioni, anche apprezzabili: a tal fine, nelle valutazioni conclusive si terrà conto in via cautelativa di un margine di tolleranza tale da rappresentare anche la variabilità dei parametri di input.

### 7.1. Valutazione delle vibrazioni ai ricettori

La determinazione della curva di propagazione dei vettori di accelerazione (vettore immissione (Vimm) vettore residuo (Vres) e vettore sorgente (Vsorg) prodotti dall'esercizio della tratta stradale di progetto permette di definire, nelle tabelle seguenti, la distanza oltre la quale sono rispettati i limiti previsti dalla UNI 9614:2017.

Di seguito la valutazione della distanza dalla carreggiata esterna in base destinazione d'uso del ricettore per la fase di esercizio della viabilità stradale.

Postazione	Vsorg Limite (mm/s <sup>2</sup> )	Distanza Limite per sezione a Raso o Rilevato (m)		Distanza Limite per sezione in Galleria o Trincea (m)		Distanza Limite per sezione a Raso o Rilevato (m)	
		B1	B2	B1	B2	BL1	BL2
Limite Diurno Abitazione	<b>7,2</b>	1,4	1,6	0,0	0,0	1,1	1,2
Limite Notturno Abitazione	<b>3,6</b>	10,2	8,0	5,7	2,2	6,8	7,0
Limite Diurno Festivo Abitazione	<b>5,4</b>	3,1	3,3	0,1	0,1	2,6	2,8
Limite Luoghi di Lavoro	<b>14</b>	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
Limite Ospedali, case di cura e affini	<b>2</b>	13,7	14,1	11,6	13,3	12,8	13,0
Asili e case di riposo	<b>3,6</b>	6,8	7,1	1,1	1,3	6,1	6,3

Postazione	Vsorg Limite (mm/s <sup>2</sup> )	Distanza Limite per sezione a Raso o Rilevato (m)		Distanza Limite per sezione in Galleria o Trincea (m)		Distanza Limite per sezione a Raso o Rilevato (m)	
		B1	B2	B1	B2	BL1	BL2
Scuole	<b>5,4</b>	3,1	3,3	0,1	0,1	2,6	2,8

Considerando che il modello eseguito risulta cautelativo, in quanto si basa su indagini su tracciati stradali attualmente attivi e nel quale non si è considerato che la futura infrastruttura avrà un nuovo pacchetto stradale, si valuta che i ricettori non risentiranno del fenomeno di “annoyance” generato dall’esercizio della nuova viabilità di grande comunicazione. Infatti, dall’analisi delle distanze limite ottenute dalla valutazione previsionale e l’ubicazione dei ricettori, in relazione alla destinazione d’uso degli stessi, si riscontra l’assenza di edifici ricadenti nelle distanze valutate per il rispetto dei limiti indicati dalla UNI 9614:2017.

## 7.2. Tecniche di mitigazione delle vibrazioni

Dalle valutazioni compiute non risulta necessaria l'adozione di mitigazioni per la matrice vibrazioni per la fase di esercizio. 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.

### 7.2.1. Mitigazioni delle vibrazioni in fase di esercizio

Per la riduzione delle vibrazioni associato alla fase di esercizio è necessario premettere che uno dei sistemi di mitigazione più efficienti è 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.

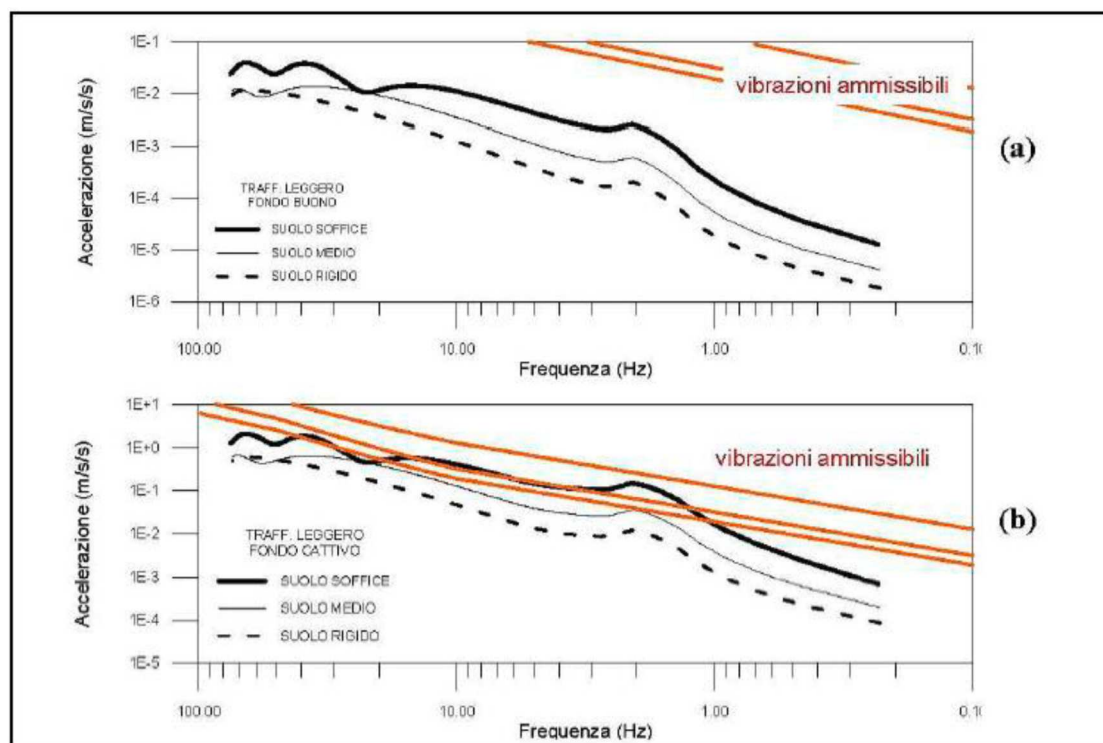


Figura 7-1 - Influenza della rugosità del fondo stradale - (a) fondo buono - (b) fondo scadente

Gli interventi di mitigazione delle vibrazioni possono essere suddivisi in due tipologie:

- Interventi di tipo passivo;
- Interventi di tipo attivo.

Gli interventi di tipo passivo consistono nella riduzione della propagazione delle vibrazioni introducendo degli ostacoli nel mezzo di propagazione delle stesse nel percorso tra la sorgente ed il ricevitore. Interventi di tipo passivo possono essere trincee profonde o diaframmi realizzati nel terreno parallelamente alla strada, i quali interrompono la propagazione delle onde. I diaframmi possono essere realizzati verticalmente con spostamento del suolo (p.es. infissione setto prefabbricato), con mescolamento di suolo in situ (p.es. jet-grouting) o con asportazione del terreno (p.es. trincee profonde).

Gli interventi di tipo attivo hanno lo scopo di ridurre l'emissione della vibrazione sulla sorgente e possono prevedere interventi sulla piattaforma stradale. Gli interventi di tipo attivo possono essere relativi a platee di tipo flottante, con materassino elastomerico, oppure utilizzando manufatti flottanti in calcestruzzo armato, con sospensioni in gomma come piastre elastomeriche.

La soluzione prevede quindi che sia individuato il tipo di materassino antivibrante che si intende impiegare nell'opera e la sua integrazione nel pacchetto stradale. Da letteratura i materassini (elastomerici) hanno una densità da 100 a 600 kg/m<sup>3</sup>, spessori da 20 a 50 mm e prestazioni di riduzione delle vibrazioni di almeno 10 dB. In applicazione in tratti allo scoperto la scelta dovrà prevedere materiali adatti per applicazione all'esterno.

## 8. CANTIERIZZAZIONE

Al fine di ottimizzare la risoluzione delle problematiche produttive connesse alla fase esecutiva delle opere è stata prevista la realizzazione di tre distinte tipologie di aree:

- **Campo base:** svolge funzione di coordinamento e controllo, direzione lavori, ristoro e ricovero maestranze;
- **Cantiere Operativo:** si tratta di aree di deposito materiali, frantumazione degli inerti e confezionamento del calcestruzzo;
- **Aree tecniche:** si tratta di aree di servizio funzionali alla realizzazione delle diverse opere d'arte previste nel progetto. Non si configurano come aree di cantiere dotate di strutture ed impianti fissi, ma avranno funzione di deposito materiali e mezzi operativi impiegati lungo il tracciato.

La valutazione dell'impatto vibrazionale indotto dalle sorgenti viene eseguita verificando i livelli di immissione.

La valutazione passa attraverso la simulazione delle sorgenti connesse al cantiere (sia fisse sia mobili) in un modello geometrico che permetta di prevedere i livelli ai ricettori; saranno questi ultimi livelli ad essere confrontati con i limiti associati al ricettore.

Risulta importante sottolineare che al fine di ridurre l'impatto acustico dei cantieri la loro operatività non potrà interessare o dovrà essere comunque molto ridotta nelle seguenti fasce orarie notturne:

- 22:00-06:00 per tutte le attività;
- 20:00-08:00 per le attività particolarmente rumorose e generatrici di vibrazioni.

### 8.1. Metodologia di analisi

Per lo studio dell'impatto connesso alle aree di cantiere si è proceduto:

- a identificare l'area da indagare al fine di definire il quadro di calcolo per le modellizzazioni;
- a analizzare la relazione di cantierizzazione ed acquisire le informazioni di carattere acustico e vibrazionale in essa contenute al fine di individuare la fase più critica e procedere alla sua analisi assegnando ad ogni sorgente una specifica emissione di vibrazione.
- ad individuare nel quadro di calcolo le posizioni dei ricettori
- a valutare le distanze limite entro le quali è prevedibile il superamento dei limiti della UNI 9614:2017.

Si descrive di seguito la valutazione dell'impatto delle attività di realizzazione dell'opera sul territorio circostante (fase di cantiere) prendendo in considerazione gli scenari più significativi per la trasmissione delle vibrazioni.

### 8.2. Valutazione di impatto delle vibrazioni prodotte dal cantiere

Lo studio previsionale delle vibrazionali dovute alla fase di realizzazione della nuova infrastruttura andrà a valutare gli effetti in termini di disturbo alle persone. Per questa ragione, qualora si verifichi dall'esame delle mappe di simulazione la presenza di edifici nelle più zone più critiche, questo fatto non può rivestire alcuna valenza per la stima di un possibile danno alle strutture, evidenziando



unicamente il superamento di una soglia di disturbo per i residenti dell'edificio stesso, soglia che peraltro attualmente, pur ricavata dalle normative tecniche esistenti in sede nazionale ed internazionale, non risulta fissata da alcun atto legislativo.

La possibilità che in fase di cantiere si manifestino danni agli edifici e/o ai sottoservizi appare ragionevolmente imputabile in modo preponderante all'eventuale instaurarsi di cedimenti, piuttosto che a fenomeni vibratorii.

Va infatti ricordato come in corso d'opera, stante l'adozione di tecniche di scavo, consolidamento, palificazione etc. a bassissima emissione di vibrazioni, è assai poco probabile che siano i fenomeni vibratorii ad originare criticità rilevanti per la stabilità dei fabbricati e la creazione di lesioni o sistemi fessurativi.

Al contrario accadimenti quali il mancato controllo dei cedimenti differenziali, l'inadeguatezza degli interventi di pre-consolidamento, la presenza di rilevanti assestamenti del terreno in termini di volume di scavo perso e non equilibrato, sono i principali responsabili dell'instaurarsi di simili problematiche.

L'analisi delle interferenze vibrazionali si riferiscono agli aspetti connessi al disturbo potenziale sui ricettori e quindi ai criteri individuati dalla norma UNI 9614:2017 per le attività di cantiere. A riguardo occorre precisare inoltre come a differenza del rumore ambientale per il tema delle vibrazioni non esiste al momento una specifica legge che stabilisca limiti quantitativi per l'esposizione alle vibrazioni rispetto al tema del disturbo. 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)". Ad essa, seppur con alcune non trascurabili differenze, fa riferimento la norma UNI 9614 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo", considerata in tale studio come riferimento in quanto indica i valori di riferimento per ciascuna tipologia di ricettore.

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 oggetto.

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.

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.

### 8.2.1. Quadro tecnico e normativo

La caratterizzazione delle emissioni di vibrazioni da parte dei mezzi ed impianti non è soggetta alle rigorose normative e disposizioni legislative che normano invece l'emissione del rumore. Pertanto, in questo caso non si ha una caratterizzazione dell'emissione in condizioni standardizzate e una garanzia del costruttore del mezzo a non superare un preciso valore dichiarato. Non si hanno nemmeno valori limite da rispettare per quanto riguarda i livelli di accelerazione comunicati ai recettori e quindi ovviamente non è possibile specificare la produzione di vibrazioni con lo stesso livello di dettaglio con cui è possibile operare per il rumore.

Per la trattazione di dettaglio del quadro tecnico-normativo, nonché per il riferimento alla bibliografia considerata, si rimanda alla Parte relativa allo "Scenario di Esercizio".

Le norme di riferimento per la valutazione delle vibrazioni sono le seguenti:

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

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

La valutazione della fase di cantiere sarà eseguita in base alla norma UNI 9614:2017, in considerazione del fatto che se rispettati i suoi limiti, essendo più restrittivi, si considerano rispettati anche i limiti della UNI 9916. Di seguito si riportano i limiti considerati in relazione alla destinazione d'uso dell'edificio della 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 di ogni ordine e grado (limitatamente al periodo di utilizzo)	$5,4 \cdot 10^{-3}$

Tab. 8.1 - Valori di riferimento individuati dalla normativa tecnica UNI 9614:2017

### 8.2.2. Definizione del disturbo vibrazionale

La caratterizzazione del disturbo vibrazionale è effettuata in termini di definizione del Vettore Sorgente ( $V_{sorg}$  espresso in  $\text{mm/s}^2$ ) ossia del vettore accelerazione relativo alla sorgente in valutazione per determinare la percezione umana e della velocità (in  $\text{mm/s}$ ) 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 valutati sulla scala dei dB, tramite le relazioni:

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

in cui compaiono i valori di riferimento  $a_0 = 0.001 \text{ mm/s}^2$  e  $v_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ mm/s}$ .

### 8.2.3. Metodologia per la valutazione dei livelli vibrazionali di cantiere

Il fenomeno con cui un prefissato livello di vibrazioni imposto sul terreno si propaga nelle aree circostanti è correlato alla natura del terreno, alla frequenza del segnale 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.

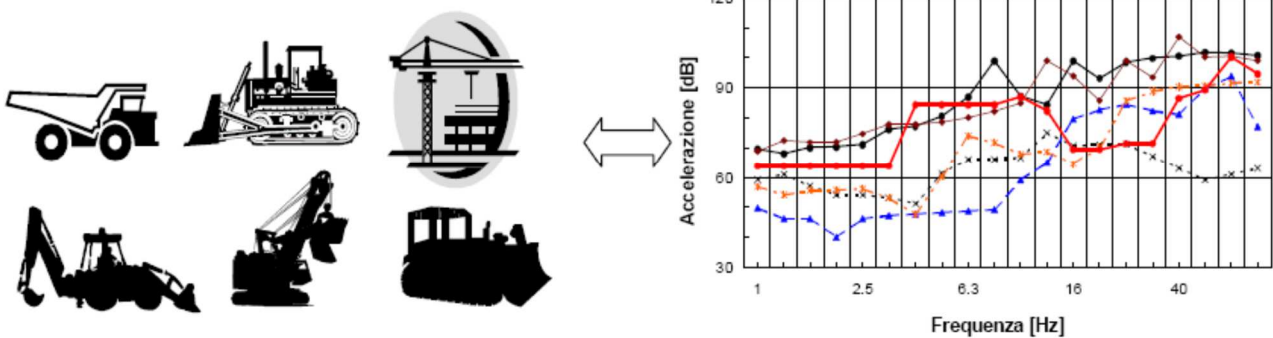


Figura 8-1 - relazione tra mezzi d'opera e spettro di emissione di vibrazioni

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 ( $A_{TOT,f}$ ) 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.

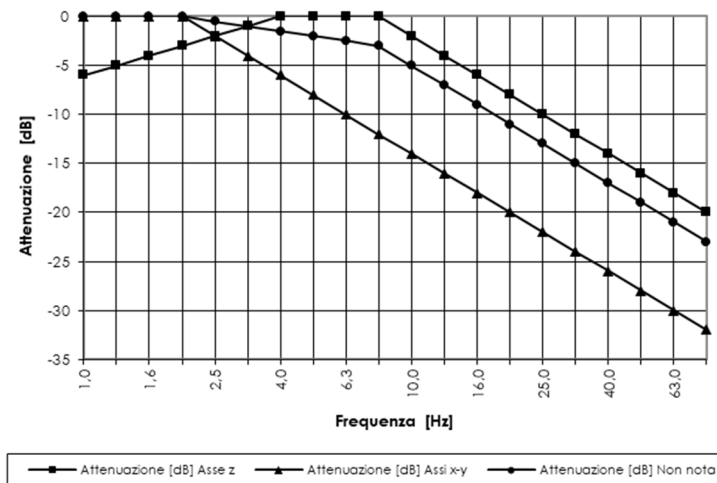


Figura 8-2 - Filtri di ponderazione per i diversi assi di riferimento

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.

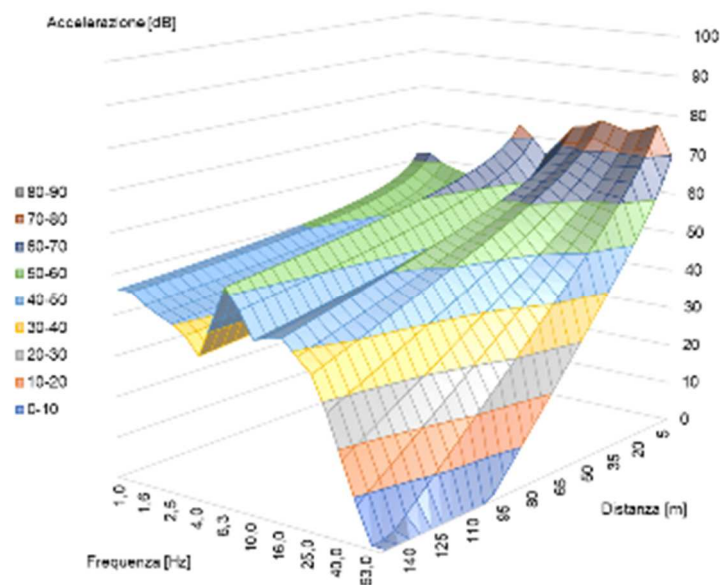


Figura 8-3 - Propagazione dello spettro di vibrazione

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 o tramite indagini sperimentali o in base a dati noti di letteratura basati sulla fruizione dei luoghi relativamente alla destinazione d'uso.

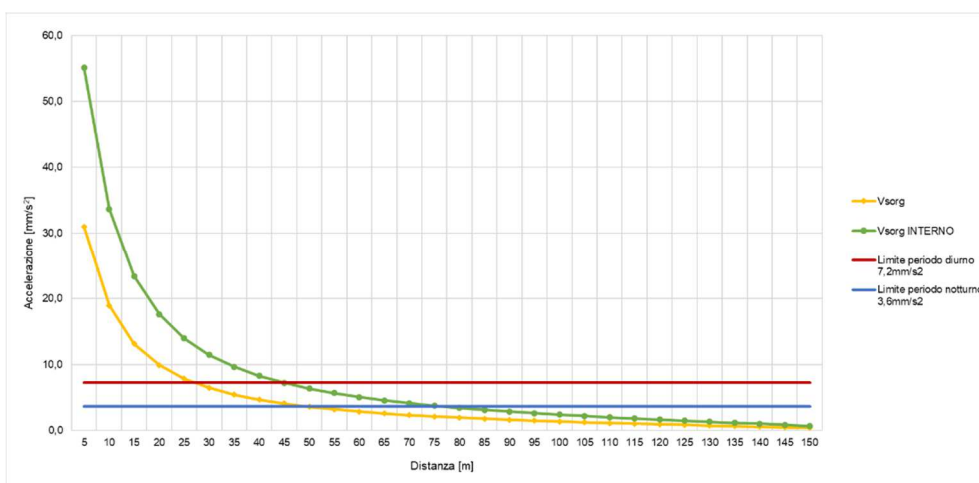


Figura 8-4 - Valutazione della propagazione del livello di vibrazioni (Vettore Sorgente) a diverse distanze

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 ricettore e della destinazione d'uso.

#### 8.2.4. Modello di calcolo

Al fine dell'esecuzione del calcolo della propagazione delle vibrazioni saranno presi in considerazione due posizioni che possono assumere le sorgenti: sarà identificato il caso in cui le sorgenti sono in superficie (sorgenti superficiali) ed in profondità (sorgenti profonde).

##### **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.

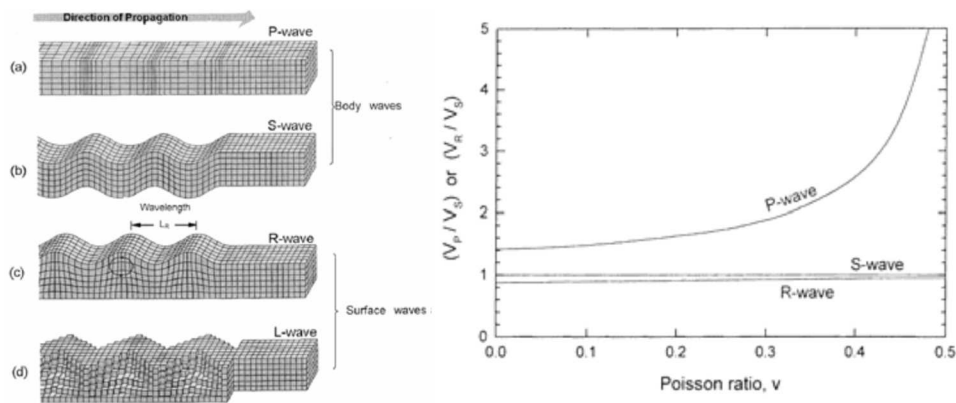


Figura 8-5 - Tipi di onda di volume e di superficie (a sinistra) e velocità relativa delle onde P, R rispetto onde S (a destra)

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:

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

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

Tab. 8.2 - 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  $\eta/c$  (indicato anche come  $\rho$ ) 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	$\rho$
I	Cedevole o tenero (terreno che può essere scavato facilmente)	0.003-0.01	$2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$
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	< $6 \times 10^{-6}$

Tab. 8.3 - 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.

### **Sorgenti in profondità**

Nel caso dell'attività di cantiere ove intervenga necessità di realizzazioni di opere in profondità (palificazione, 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:

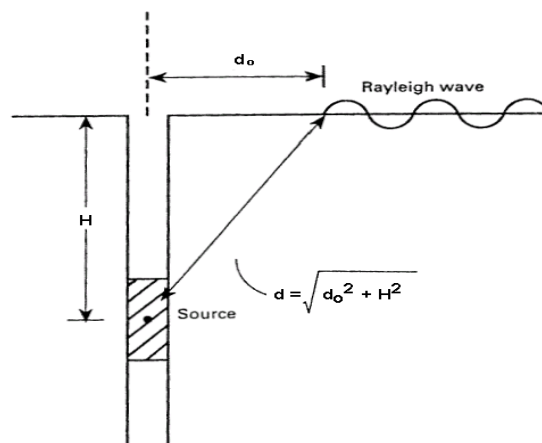


Figura 8-6 - Schema della propagazione a partire da una sorgente profonda

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.

### **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;
- il terreno si ipotizza di tipo consolidato, appartenete alla Classe II ( $\rho < 1.5 \times 10^{-4}$ ) e di categoria C ( $c=300\text{m/s}$ ;  $\eta=0.04$ );
- 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 circa ad  $1/2$  della lunghezza dell'elemento fisso nel terreno;
- 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.

### **8.2.5. Definizione e previsione degli scenari**

Con riferimento alle vigenti normative, le attività di cantiere possono essere definite come sorgenti di vibrazione intermittente. Un ricettore adiacente all'area di cantiere è infatti soggetto ad una serie di eventi di breve durata, separati da intervalli in cui la vibrazione ha una ampiezza significativamente più bassa. In relazione alle attività lavorative di cantiere previste per la realizzazione dell'opera in esame, sono stati individuati scenari di cantiere critici per il potenziale impatto in termini di vibrazioni sull'ambiente circostante.

In particolare, le emissioni vibrazionali durante le lavorazioni connesse alla realizzazione dell'opera in esame sono legate alle lavorazioni discontinue nelle aree di cantiere e nei fronti di avanzamento dei cantieri di linea.

Sono state quindi adottate alcune ipotesi, di seguito descritte che schematizzano e semplificano la fase di costruzione dell'opera. Si ipotizzano quindi le fasi di lavoro standard necessarie per la



realizzazione di una infrastruttura. Le attività necessarie alla realizzazione dell'opera dipendono dalla tipologia progettuale della linea. In corrispondenza dei sottocantieri di ciascun cantiere si svolgono diverse attività che possono essere considerate suddivise nelle seguenti fasi temporali generiche:

- taglio e rimozione della pavimentazione stradale esistente, sbancamento
- stesa strati / movimentazione materie;
- compattazione;
- getto del sottofondo;
- posa dei materiali;
- getto della soletta;
- finitura superficiale e realizzazione della pavimentazione

Poiché la massima emissione si sviluppa nel corso delle prime tre fasi, che danno luogo alla massima attività di mezzi da cantiere, l'analisi è stata effettuata con riferimento allo svolgimento di tali lavorazioni. In particolare, l'attività del cantiere di linea è stata analizzata suddividendola in due scenari distinti afferenti a queste tre fasi per tener conto della forte discontinuità della fase di compattazione. Il primo scenario (cantiere di linea fase A) tiene conto delle lavorazioni di taglio e rimozione della pavimentazione stradale esistente, sbancamento e stesa nuovi strati. Il secondo scenario (cantiere di linea fase B) alle lavorazioni della fase A viene aggiunta la compattazione con rullo vibrante, questa risulta essere particolarmente gravosa in termini di immissioni vibrazionali, tuttavia, si esaurisce in un orizzonte temporale assai limitato. In aggiunta allo scenario del cantiere di linea (suddiviso in fase A e B) è stato poi valutato lo scenario corrispondente alla realizzazione della galleria nell'area di cantiere corrispondente alla sua realizzazione (A2).

Si rammenta come l'impatto vibrazionale nelle simulazioni numeriche sarà valutato in termini di livello ponderato globale di accelerazione  $a_w$  in campo libero, (secondo la normativa UNI 9614 per asse generico), per un confronto con i valori di riferimento per il disturbo alle persone.

### ***Definizione del tipo di sorgente***

Analizzando le principali sorgenti previste in funzione delle attività lavorative, si conviene come esse siano sostanzialmente raggruppabili in macchine operatrici ed in mezzi adibiti al trasporto, le prime hanno una distribuzione spaziale abbastanza prevedibile e delimitata all'interno dell'area di lavoro e stoccaggio mentre, i secondi si distribuiscono lungo il percorso che collega il fronte di avanzamento lavori ai luoghi di approvvigionamento o di stoccaggio.

Gli scenari in esame sono stati definiti avendo come prima finalità quella di fornire risultati sufficientemente cautelativi. Si sottolinea tuttavia come le situazioni esaminate non possano comunque rappresentare tutti i macchinari potenzialmente presenti in contemporanea all'interno dell'area di cantiere. La valutazione dei livelli vibrazionali è stata quindi condotta a fronte dell'acquisizione degli spettri di emissione dei macchinari di cantiere sopra citati utilizzando dati bibliografici o rilevati. Gli spettri impiegati sono riferiti a misure eseguite ad una distanza di circa 5m dalla sorgente vibratoria e sono afferenti alla componente verticale, la quale sarà assunta come componente principale del vettore di propagazione delle vibrazioni (vettore immissione).

In generale, nelle aree di cantiere ove sono presenti gli impianti fissi (betonaggio, lavorazioni di dettaglio su eventuali prefabbricati, ecc.) le emissioni di vibrazioni risultano usualmente più contenute rispetto a quelle presenti sul cantiere in linea poiché la natura stessa delle lavorazioni determina minori sollecitazioni meccaniche sul terreno e, di conseguenza, minore trasmissione di energia meccanica verso i potenziali ricettori.

Il calcolo del livello di vibrazione in condizioni di campo libero sarà definito nell'intorno del cantiere con una risoluzione di circa 5 m nelle direzioni orizzontali (piano di campagna), ottenendo il grafico della propagazione delle vibrazioni in funzione della distanza.

Di seguito si riporta la definizione dello scenario operativo.

La metodologia assunta per l'analisi delle interferenze rispetto al clima acustico riferita alla fase di cantierizzazione si basa sulla teoria del "Worst Case" Scenario. Tale metodo individua la condizione operativa di cantiere più gravosa in termini di emissioni di vibrazioni sul territorio in modo che verificandone le condizioni di esposizione del territorio alle vibrazioni indotte rispetto ai limiti della UNI 9614:2017 possano essere individuate le eventuali soluzioni di mitigazione più opportune al fine di contenere il disturbo sui ricettori più esposti. L'analisi tiene conto dell'insieme delle diverse attività di cantiere in funzione della localizzazione delle diverse aree di lavoro e della distribuzione temporale delle lavorazioni.

Come riportato in precedenza al fine di caratterizzare la forte discontinuità delle fasi di linea del cantiere lo studio previsionale delle vibrazioni prende in considerazione tre distinti scenari:

- Scenario 1: Cantiere di linea fase A;
- Scenario 2: Cantiere di linea fase B;
- Scenario 3: Realizzazione galleria.

Per ciascun scenario è stata considerata la condizione operativa potenzialmente più impattante definita sulla scorta dei ricettori presenti, lavorazioni previste, impianti e macchinari presenti, caratteristiche emissive e maggior frequenza di esecuzione.

Per gli scenari elencati sono stati considerati i seguenti mezzi che per eseguire una valutazione conservativa, si ipotizza lavoreranno simultaneamente. Per quanto riguarda l'orario di lavoro, si assume una operatività, su due turni nel periodo diurno tra le 8:00 – 22:00, per un totale di 16 ore lavorative.

- **Scenario 1**

<b>Sc. 1 – Cantiere di linea fase A</b>	
Mezzi	Unità
Fresatrice	1
Pala Meccanica	1
Livellatrice	1

Tab. 8.4 – Scenario 1

- **Scenario 2**

<b>Sc. 2 – Cantiere di linea fase B</b>	
Mezzi	Unità
Fresatrice	1
Pala Meccanica	1
Livellatrice	1
Rullo	1

Tab. 8.5 – Scenario 2

- **Scenario 3**

<b>Sc. 3 – Realizzazione galleria</b>	
Mezzi	Unità
Escavatore cingolato con benna	1
Carrello elevatore	1
Autobetoniera durante il getto	1
Trivella cingolata idraulica per pali e/o diaframmi	1

Tab. 8.6 – Scenario 3

La valutazione dei livelli vibrazionali è stata quindi condotta a fronte dell'acquisizione degli spettri di emissione dei macchinari di cantiere utilizzando dati bibliografici e misure dirette in campo. Gli spettri impiegati sono riferiti a misure eseguite ad una distanza di circa 5m dalla sorgente vibratoria e sono afferenti alla sola componente verticale considerata quella che fornisce il contributo maggiore sul vettore immissione. Si precisa infine che stante l'indisponibilità di dati sperimentali per tutti i macchinari presenti nel cantiere in esame, si è proceduto utilizzando quelli di macchine in grado di trasmettere al terreno sollecitazioni di simile entità, ma di cui sia noto lo spettro.

Di seguito le tabelle ed i grafici di caratterizzazione delle sorgenti di vibrazioni individuate negli scenari di riferimento. I valori seguenti sono espressi in mm/s<sup>2</sup>.

**Sc. 1 - Cantiere di linea fase A**

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
Fresa per asfalti Marini assimilata a 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
Pala meccanica gommata assimilata a Pala Cingolata	5	0,71	0,50	0,63	0,67	0,60	0,45	0,24	1,12	5,62	3,98	2,51	2,99	1,58	3,98	19,95	29,85	35,48	37,58	39,81	42,17
Livellatrice assimilata a Pala Cingolata	5	0,71	0,50	0,63	0,67	0,60	0,45	0,24	1,12	5,62	3,98	2,51	2,99	1,58	3,98	19,95	29,85	35,48	37,58	39,81	42,17

**Sc. 2 - Cantiere di linea fase B**

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
Fresa per asfalti Marini assimilata a 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
Pala meccanica gommata assimilata a Pala Cingolata	5	0,71	0,50	0,63	0,67	0,60	0,45	0,24	1,12	5,62	3,98	2,51	2,99	1,58	3,98	19,95	29,85	35,48	37,58	39,81	42,17
Livellatrice assimilata a Pala Cingolata	5	0,71	0,50	0,63	0,67	0,60	0,45	0,24	1,12	5,62	3,98	2,51	2,99	1,58	3,98	19,95	29,85	35,48	37,58	39,81	42,17
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

**Sc.3 - Realizzazione galleria**

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
Carrello elevatore e Autobotoniera assimilati 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
Realizzazione paratie con trivellazione/diaframma assimilato a martello idraulico in attività su	5	2,55	3,98	3,17	2,82	3,77	7,94	14,13	17,78	25,12	56,23	25,16	17,98	31,62	59,31	82,91	100,00	113,48	89,13	79,43	74,99

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



Figura 8-7 - Spettri delle sorgenti dei macchinari con confronto con curva di percezione della UNI 9614 per l'asse Z – Scenari 1 e 2

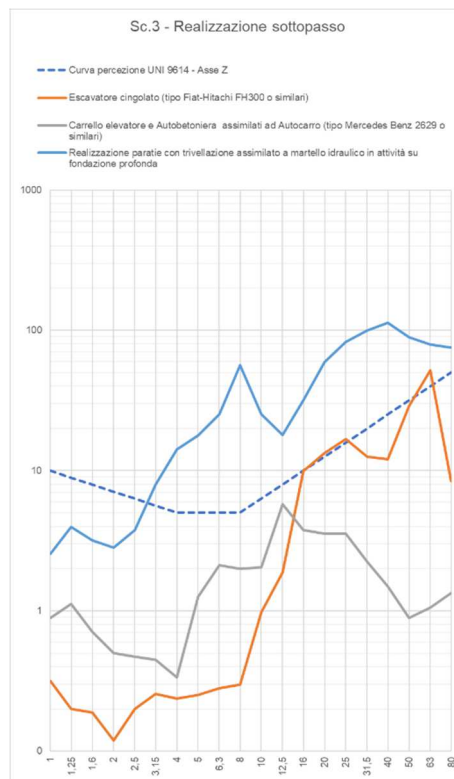


Figura 8-8 - Spettri delle sorgenti dei macchinari con confronto con curva di percezione della UNI 9614 per l'asse Z – Scenario 3

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 attività di compattazione tramite l'impiego di rullo vibrante, attività che avranno comunque una durata limitata.

### **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.

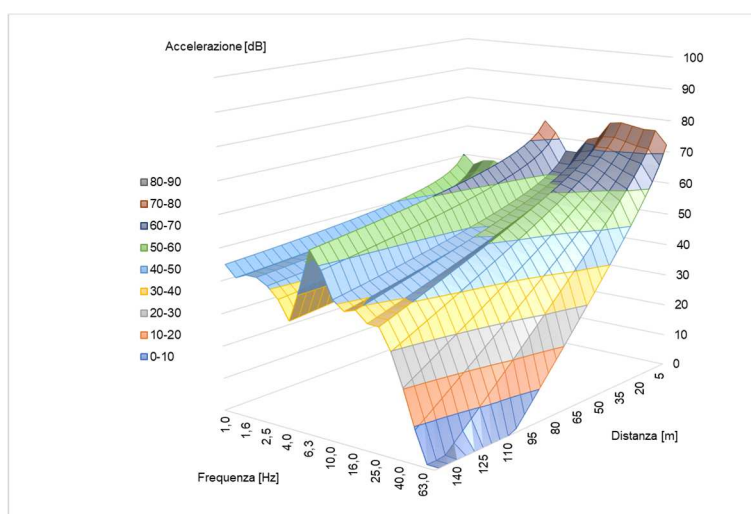


Figura 8-9 - Propagazione dei livelli di accelerazione in dB per singola frequenza per Sc. 1 – Cantiere di Linea fase A

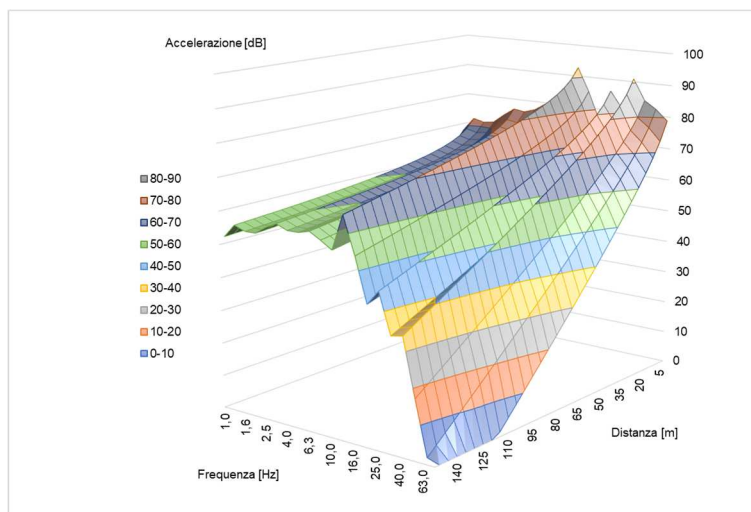


Figura 8-10 - Propagazione dei livelli di accelerazione in dB per singola frequenza per Sc.2 - Cantiere di Linea fase B

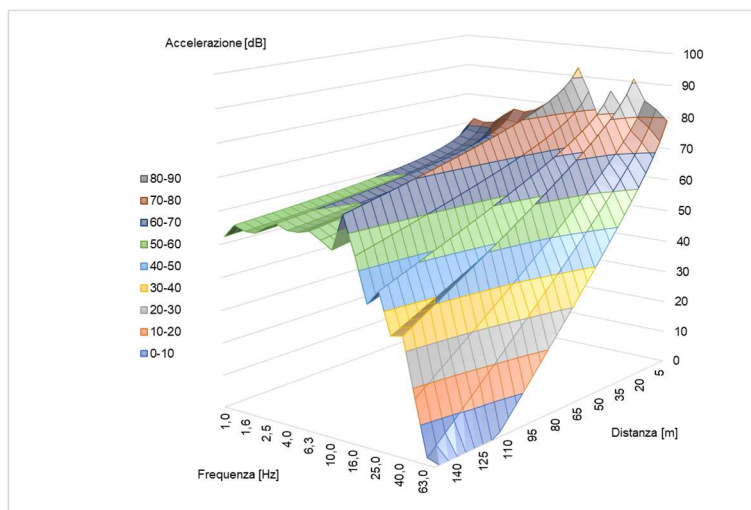


Figura 8-11 - Propagazione dei livelli di accelerazione in dB per singola frequenza per Sc.3 – Realizzazione galleria

### **Stima dei livelli di vibrazione**

Il modello di propagazione illustrato fa riferimento ai soli fenomeni che avvengono nel terreno, supposto omogeneo ed isotropo (perlomeno all'interno di ogni strato), senza tenere in considerazione 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 assunto per edifici residenziali un valore limite ammissibile pari a  $7,2 \text{ mm/s}^2$  in virtù del periodo di lavoro diurno, si applicherà un fattore che tenga conto della possibile sovramplicazione da parte della struttura dell'edificio ricettore (assunta mediamente pari a  $+5\text{dB}^2$ ) permettendo così la valutazione all'interno degli edifici.

In relazione al Vettore Residuo, nel modello, al fine della determinazione di  $V_{\text{ Sorg}}$  ed in modo da individuare una previsione conservativa, sarà usato il valore minore dei residui, ossia  $0,4 \text{ mm/s}^2$ .

<sup>2</sup> 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.

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.

**Sc. 1 – Cantiere di linea fase A.** Per questa condizione operativa il limite del periodo diurno di  $7,2 \text{ mm/s}^2$  per i ricettori residenziali si considera cautelativamente raggiunto ad una distanza di circa 20 m dal confine delle aree di cantiere. Considerando i possibili effetti di amplificazioni prodotti dagli edifici (assunti pari a +5 dB), è raggiunto a una distanza di circa 35 m.

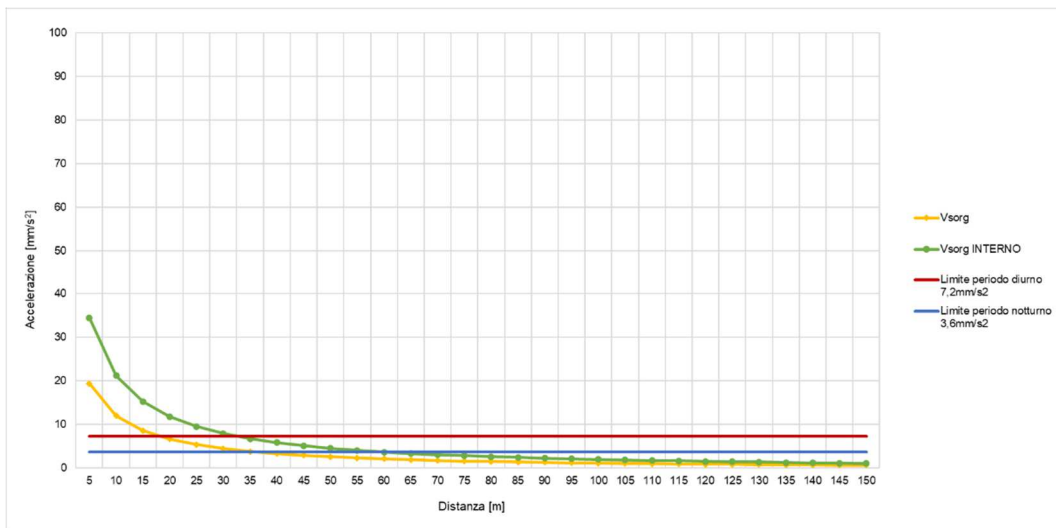


Figura 8-12 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati sui ricettori residenziali per Sc. 1 – Cantiere di Linea fase A – Periodo diurno

**Sc.2 – Cantiere di linea fase B.** Per questa condizione operativa il limite del periodo diurno di  $7,2 \text{ mm/s}^2$  per i ricettori residenziali si considera cautelativamente raggiunto ad una distanza di circa 80 m dal confine delle aree di cantiere. Considerando i possibili effetti di amplificazioni prodotti dagli edifici (assunti pari a +5 dB), è raggiunto a una distanza di circa 120 m.

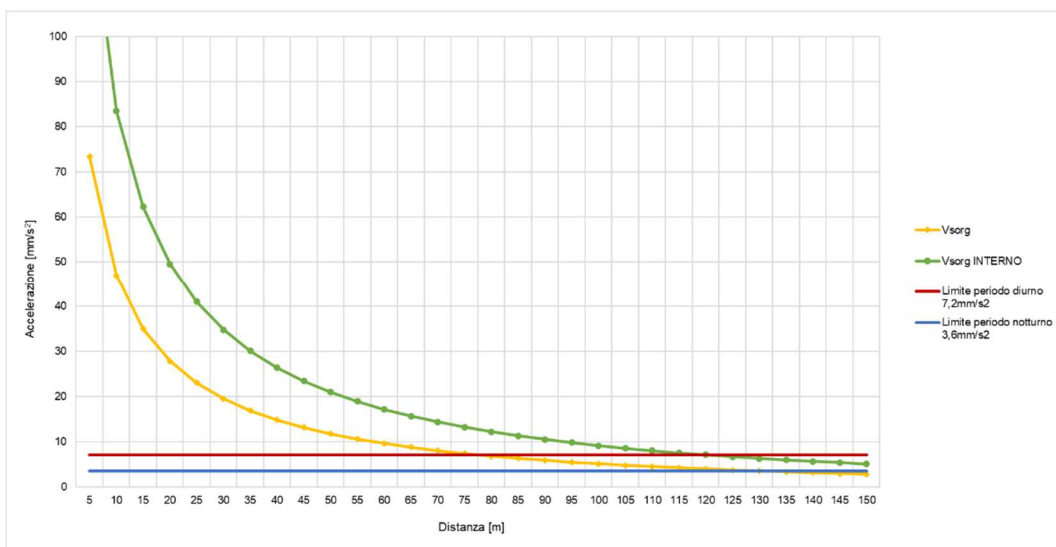


Figura 8-13 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati sui ricettori residenziali per Sc.2 – Cantiere di Linea fase B

**Sc.3 – Realizzazione galleria.** Per questa condizione operativa il limite del periodo diurno di  $7,2 \text{ mm/s}^2$  per i ricettori residenziali si considera cautelativamente raggiunto ad una distanza di circa 25

m dal confine delle aree di cantiere. Considerando i possibili effetti di amplificazioni prodotti dagli edifici (assunti pari a +5 dB), è raggiunto a una distanza di circa 45 m.

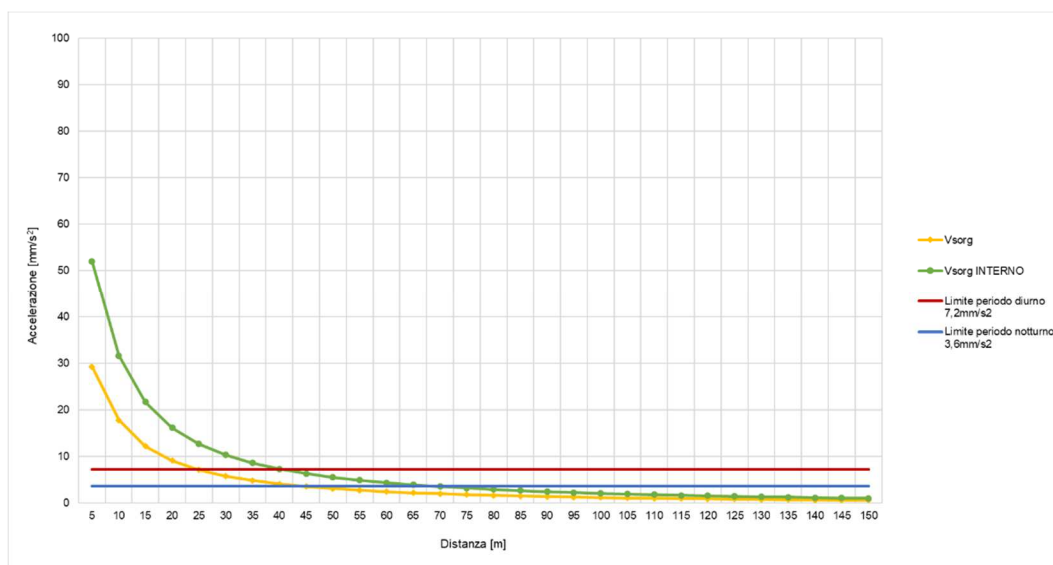


Figura 8-14 Propagazione dei livelli di accelerazione stimati sui ricettori residenziali per Sc.3 – Realizzazione galleria

In sintesi, le distanze per cui è raggiunto il limite del periodo diurno di 7,2 mm/s<sup>2</sup> per i ricettori residenziali e considerando i possibili effetti di amplificazioni prodotti dagli edifici (assunti pari a +5 dB), sono riportate nella tabella seguente.

Scenario	Descrizione fase di lavorazione	Distanza del limite Diurno di 7,2 mm/s <sup>2</sup> [m]	Distanza del limite Diurno di 7,2 mm/s <sup>2</sup> interno agli edifici [m]
Sc.1	Cantiere di linea fase A	20	35
Sc.2	Cantiere di linea fase B	80	120
Sc.3	Realizzazione galleria	25	45

Tab. 8.7 - Sintesi distanze dal confine delle aree di cantiere per cui si hanno valori di vibrazioni eccedenti i limiti

Considerando la vicinanza alle lavorazioni di strutture, si segnala l'eventualità di alcune criticità legate al possibile superamento della soglia di disturbo in dipendenza dalla distanza dei ricettori nel periodo di riferimento diurno. In particolare, se si considera la fase B del cantiere di linea che vede in funzione il rullo per le attività di compattazione, a tal proposito si sottolinea che tale fase si esplica in un orizzonte temporale estremamente limitato rispetto alla durata delle lavorazioni.

A seguito di ciò si dovranno adottare delle misure al fine del contenimento delle vibrazioni, quale la buona pratica di conduzione delle attività di cantiere ed eventualmente procedere ad una valutazione di maggior dettaglio con la redazione del "piano di gestione dell'impatto vibrazionale di cantiere" e la predisposizione di un monitoraggio per la verifica puntuale dei risultati predetti, nonché eseguire una buona comunicazione ai ricettori che potrebbero essere interessati dal fenomeno delle vibrazioni.



Di seguito si procede ad una analisi puntuale che permetterà di individuare la tipologia e il numero di ricettori per i quali è stimato un probabile superamento del limite all'interno dell'edificio. Inoltre, per ogni ricettore si è proceduto al calcolo delle vibrazioni immesse.

### **8.2.6. Valutazione delle vibrazioni ai ricettori**

Di seguito si espone la valutazione della propagazione delle vibrazioni presso i ricettori relativi alle aree di lavoro. In dettaglio:

- Scenario 1: Cantiere di linea fase A;
- Scenario 2: Cantiere di Linea fase B;
- Scenario 3: Realizzazione galleria.

Per ciascun scenario è stata considerata la condizione operativa potenzialmente più impattante definita sulla scorta dei ricettori presenti, lavorazioni previste, impianti e macchinari presenti, caratteristiche emissive e maggior frequenza di esecuzione.

Considerando il territorio in cui si inserisce l'opera molti ricettori si trovano a ridosso delle aree di cantiere. Si evidenzia che l'ampiezza delle vibrazioni durante le lavorazioni potrebbe comprendere ricettori siti nelle vicinanze del cantiere. Dall'analisi della propagazione delle vibrazioni si individuano ricettori a destinazione residenziale che potrebbero subire valori oltre il limite.

In merito alla fase di compattazione stradale, questa fase ha realisticamente una durata molto limitata per ogni fronte di avanzamento del cantiere di linea, di conseguenza il possibile disturbo arrecato sarà di breve durata per ogni ricettore. Si evidenzia che l'ampiezza delle vibrazioni durante le lavorazioni potrebbe comprendere ricettori siti nelle vicinanze del cantiere e oltre.

In merito alla realizzazione della galleria considerando il territorio urbano in cui si inserisce l'opera alcuni ricettori si trovano a ridosso delle aree di cantiere. Si evidenzia che l'ampiezza delle vibrazioni durante le lavorazioni potrebbe comprendere ricettori siti nelle vicinanze del cantiere.

### **8.2.7. Conclusioni allo studio previsionale delle vibrazioni in fase di cantiere**

Per lo scenario 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 della norma UNI 9614:2017 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 quindi imputato il layout delle diverse fasi del cantiere di linea 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 sono:

- Scenario 1: Cantiere di linea / fase A;
- Scenario 2: Cantiere di linea / fase B;
- Scenario 3: Realizzazione galleria.

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, 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 fissi sono state schematizzate all'interno del modello di calcolo come sorgenti di tipo puntuale e posizionate lungo il perimetro dell'area di lavoro in modo da stimare cautelativamente la distanza minima da ogni ricettore.

In termini di disturbo alle persone va evidenziato come in generale tutte le 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 ravvicinata rispetto alle aree di cantiere, risulta particolarmente sensibile al fenomeno.

Pertanto, al fine di ridurre il contributo vibrazionale dovuto ai mezzi coinvolti nelle lavorazioni di cantiere risulterà necessario attuare una serie di procedure operative per limitare gli impatti e possibilmente predisporre inoltre un sistema di monitoraggio vibrazionale da attuarsi in corrispondenza delle aree limitrofe abitative per le quali sono risultate criticità. Le Autorità competenti saranno tempestivamente coinvolte al fine di concordare la corretta metodologia di monitoraggio in corso d'opera e la risoluzione di eventuali criticità.

### **8.2.8. Mitigazioni delle vibrazioni**

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;
- definire le misure di dettaglio di riduzione delle vibrazioni basandosi sulle caratteristiche dei macchinari effettivamente impiegati;
- 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 i ricettori sensibili, 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.
- nei casi in cui non sia possibile mantenere entro i limiti i livelli vibrazionali, pur avendo messo in atto tutte le pratiche al fine di ridurle e solo per attività temporanee, si ricorrerà alla stesura del "piano di gestione dell'impatto vibrazionale di cantiere" di dettaglio. Il piano potrà prevedere una sorveglianza attiva dell'immissione delle vibrazioni al fine di valutare l'efficacia delle misure di mitigazione del cantiere ed eventualmente intervenire sul ciclo di lavoro. Inoltre, potrà essere prevista una adeguata campagna di informazione ai ricettori che saranno interessati da livelli vibrazionali eccedenti i limiti indicati dalla UNI 9614 al fine di informarli sul possibile disturbo.

- di predisporre una attività informativa preventiva in modo da tenere informata la popolazione interessata e quindi facilitare la tollerabilità delle persone alle vibrazioni indotte.

### **8.2.9. Il rapporto opera – ambiente e le misure di prevenzione e mitigazione adottate durante la fase di cantiere**

In tale sede il tema delle vibrazioni indotte dalle lavorazioni è affrontato rispetto alla tematica del disturbo sui ricettori secondo la norma UNI 9614:2017. Questa definisce dei valori di riferimento in funzione del periodo temporale e della tipologia di ricettore. Nel caso specifico essendo le attività lavorative previste nel solo periodo diurno il valore soglia di riferimento è pari a  $7,2 \text{ mm/s}^2$  per i ricettori residenziali e  $5,4 \text{ mm/s}^2$  per le scuole. Al fine di una valutazione puntuale, su ogni ricettore, si è provveduto a sviluppare un modello previsionale di propagazione delle vibrazioni nella fase di cantiere.

In relazione alle conclusioni del modello previsionale delle vibrazioni sviluppato si riscontrano ricettori per i quali si potrebbe determinare il superamento del limite previsto dalla UNI 9614:2017. In particolare, per la fase di lavorazioni connesse alla compattazione del manto stradale, queste operazioni hanno però durata assai limitata nel tempo e quindi laddove si verificasse un superamento del limite previsto questo avrà caratteristiche di transitorietà.

In considerazione di quanto emerso dallo studio si dovrebbe provvedere alla predisposizione di un monitoraggio della componente che sia rappresentativo dello stato vibrazione dei ricettori che sono stati individuati. L'esecuzione dei rilievi potrà essere stabilita con esattezza in funzione del cronoprogramma esecutivo delle attività, concordando lo svolgimento delle misurazioni preventivamente con la DL. Infatti, in fase di cantiere, si potrà valutare l'opportunità di indagare solo quelli di volta in volta effettivamente saranno interessati dalle lavorazioni.

Quali ulteriori azioni che l'Appaltatore potrà mettere in atto preliminarmente ai lavori, in accordo con quanto indicato dalla norma UNI 9614:2017, si prevede:

- di individuare, qualora necessario sulla base delle necessità realizzative, eventuali valori soglia in deroga ai limiti indicati dalla UNI 9614:2017 di concerto con l'Autorità competente in virtù anche della tipologia di attività (evento breve durata e/o frequenza limitata nel giorno);
- di definire un Piano di gestione dell'impatto vibrazionale di cantiere (PGIVC) in accordo alla norma UNI 9614:2017;
- di predisporre una attività informativa preventiva in modo da tenere informata la popolazione interessata e quindi facilitare la tollerabilità delle persone alle vibrazioni indotte.

## 9. CONCLUSIONI

Lo Studio specialistico svolto sulle Vibrazioni ha riguardato la definizione e la valutazione dei livelli di esposizione alle vibrazioni indotti dalla fase di esercizio dell'asse stradale di adeguamento della **tratta B2** della nuova Pedemontana Lombarda e delle opere connesse ed è stato sviluppato in accordo alla norma UNI 9614:2017.

In particolare, è stato effettuato il censimento dei ricettori presenti nell'area di studio e condotta una campagna di misura delle vibrazioni, al fine di calibrare la sorgente stradale e di verificare l'affidabilità del modello implementato ed utilizzato per la simulazione di propagazione delle vibrazioni: affidabilità che è stata dimostrata confrontando i livelli calcolati dall'algoritmo e i valori misurati durante l'indagine.

Successivamente sono stati calcolati i livelli di vibrazioni, indotti dal traffico veicolare, in termini di propagazione e definizione della distanza limite per gli edifici ricadenti all'interno dell'ambito di studio individuato. I flussi di traffico, determinati dallo studio trasportistico, si riferiscono allo scenario di futuro esercizio. A partire dai dati di traffico, distinti in veicoli leggeri e pesanti, sono stati simulati gli scenari per gruppi di carico di traffico, usando come principale dato di input del modello i transiti dei veicoli pesanti nella fase di post operam nei due periodi di riferimento (diurno 6:00-22:00 e notturno 22:00-6:00).

Attraverso il modello di simulazione sono stati calcolati i livelli di vibrazioni in termini di vettore accelerazione sorgente ( $\text{mm/s}^2$ ) indotta dal traffico veicolare lungo l'asse stradale oggetto di studio nei diversi scenari considerati.

Per quanto concerne la condizione di esposizione alle vibrazioni indotte dalla fruizione dell'infrastruttura stradale nei scenari analizzati, la valutazione delle distanze limite dei livelli di vibrazioni calcolati agli edifici con i valori limite definiti dalla normativa di riferimento (UNI 9614:2017), permette di definire il generale rispetto della norma non mettendo in evidenza condizioni di criticità, le quali, solitamente, si potrebbero correlare alla fruizione nel periodo notturno per gli edifici ad uso abitativo.

In riferimento alla valutazione dello stato di progetto in esercizio non è quindi necessario ricorrere a sistemi di mitigazione delle vibrazioni.

Lo studio ha valutato, inoltre, l'impatto delle vibrazioni nella fase di cantiere dell'opera. Per tale fase la valutazione permette di valutare delle situazioni di criticità nella prossimità delle aree di cantiere, nella quali sono previste opere puntuali (p.es. realizzazione gallerie) e nel fronte avanzamento lavori, in particolare, per la fase di compattazione del manto stradale.

Per tali situazioni sarà necessario il ricorso ad istruzioni operative di conduzione del cantiere nelle diverse fasi di lavoro, in modo da ridurre le emissioni delle vibrazioni ed al monitoraggio dei ricettori, più prossimi alle lavorazioni, al fine di valutare la reale entità del possibile disturbo ed eventualmente procedere alla definizione del Piano di gestione dell'impatto vibrazionale di cantiere.