

COMUNE DI TORINO



TRANVIE DI TORINO - LINEA 4

**MODIFICA DEL CAPOLINEA DI FALCHERA CON LA REALIZZAZIONE  
DI UN ANELLO DI RITORNO**

**PROGETTO DI FATTIBILITA'  
TECNICO ECONOMICA**



IL PROGETTISTA

STAZIONE  
APPALTANTE

Ing. F. Calamusa  
Ordine degli Ingegneri  
della Provincia di Torino  
n. B131

R.U.P. GTT  
Geom. A. Bazzan

**RELAZIONE VALUTAZIONE IMPATTO  
VIBRAZIONALE**

**ELABORATO**

**REV.**  
int. est.

**SCALA**

**DATA**

TT04FAC0FAMBGENR008

0

0

07/06/2024

**AGGIORNAMENTI**

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	CONTROL.	APPROV.	VISTO
00	EMISSIONE	06/2024	PMe	Faz/FRI	FCa	ABa

**GRUPPO DI PROGETTAZIONE**

**CSP**

Infr. tranviaria e computi: Geom. P. Massaglia

Impianti di trazione: P.I. I. Giammo'

Rilievi: Geom. P. Massaglia; Geom. G. Macri

Geologia e archeologia: Dott. S. Strippoli

Ambiente: Dott.ssa P. Merafina

Sicurezza e cantieri: Ing. F. Cocito; Arch. L. Rizzo

Strutture: Ing. E. Cadamauro; Ing. P. DeMartini

Sis. Superficiali: Arch. D. Lamberti

Ing. F. Cocito

	TRANVIE DI TORINO – LINEA 4 Modifica capolinea Falchera con anello di ritorno <b>RELAZIONE</b>	Pag. 1 di 38
		REV. 00

## SOMMARIO

<b>1. PREMESSA</b> .....	<b>3</b>
1.1 Scopo e campo di applicazione con sintesi delle opere previste.....	3
<b>2. RIFERIMENTI NORMATIVI</b> .....	<b>4</b>
2.1 Norma UNI9614-2017 .....	4
2.1.1 <i>Limiti di riferimento indicati dalla norma per le differenti tipologie di ricettori</i> .....	6
2.2 Norma UNI9916-2014.....	6
2.2.1 <i>Indicazioni sulla modalità di valutazione delle vibrazioni</i> .....	7
2.2.2 <i>Valori limite di riferimento</i> .....	8
2.3 Approccio metodologico generale alla valutazione previsionale d’impatto da vibrazioni e rumore indotto per via strutturale.....	9
2.4 Nota a riguardo delle stime previsionali in materia di vibrazioni e di rumore indotto per via strutturale .....	10
<b>3. ANALISI DEL TERRITORIO DELLA BORGATA FALCHERA</b> .....	<b>12</b>
<b>4. RILIEVI DI VIBRAZIONI E RISULTATI CONSEGUITI</b> .....	<b>14</b>
4.1 Misurazioni di vibrazioni per la caratterizzazione delle emissioni delle nuove vetture serie 8000 .....	14
4.1.1 <i>Risultati dei rilievi dei transiti delle vetture serie 8000 lungo la curva di Piazzale Caio Mario</i> .16	
4.1.2 <i>Spettro di vibrazione di riferimento per la sorgente "transito della vettura serie 8000"</i> .....	17
4.2 Note sulla metodologia d’indagine sulle strutture edili .....	20
4.3 Risultati dei rilievi di vibrazioni per la verifica delle proprietà di trasmissione nel terreno e sull’edificio ricettore .....	22
<b>5. VALUTAZIONE PREVISIONALE DELL’IMPATTO DA VIBRAZIONI AL TRANSITO DELLE VETTURE TRANVIARIE</b> .....	<b>26</b>
5.1 Orari di previsto funzionamento dell’infrastruttura in fase di esercizio .....	26
5.2 Risultati della valutazione previsionale .....	26
5.2.1 <i>Definizione dell’obiettivo acustico di progetto per lo scenario di esercizio relativamente al rumore indotto per via strutturale</i> .....	26
5.2.2 <i>Definizione dell’obiettivo di progetto per lo scenario di esercizio relativamente al potenziale disturbo vibrotattile</i> .....	27
5.2.3 <i>Risultati del calcolo previsionale relativo alle immissioni di rumore per via strutturale</i> .....	27
5.2.4 <i>Risultati della valutazione previsionale relativa al potenziale disturbo di tipo vibrotattile</i> .....	28

	TRANVIE DI TORINO – LINEA 4 Modifica capolinea Falchera con anello di ritorno <b>RELAZIONE</b>	Pag. 2 di 38
		REV. 00

5.2.5 Valutazioni relative alla possibile correlazione tra vibrazioni e danni ai manufatti edilizi.....28

<b>6. INDICAZIONI PER IL CONTENIMENTO DELLE IMMISSIONI DI VIBRAZIONI .....</b>	<b>30</b>
6.1 Generalità sui sistemi antivibranti .....	30
6.1.1 Armamento antivibrante "a platea".....	32
6.1.2 Supporto resiliente sulla rotaia.....	32
6.1.3 Possibile combinazione delle due precedenti soluzioni .....	32
6.1.4 Aggancio della rotaia con materiali resilienti.....	33
6.1.5 Aggancio laterale della rotaia con materiali resilienti.....	33
6.1 Stima delle prestazioni minime utili per poter ricondurre gli elementi di criticità entro gli obiettivi di riferimento .....	34
6.1.1 Risultati del calcolo previsionale relativo alle immissioni di rumore per via strutturale con gli effetti del supporto elastico antivibrante .....	35
6.1.2 Risultati della valutazione previsionale relativa al potenziale disturbo di tipo vibrotattile con gli effetti del supporto elastico antivibrante .....	36
<b>7. SINTESI E CONCLUSIONI .....</b>	<b>36</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>37</b>
<b>ALLEGATO N.1 CERTIFICATI DI TARATURA DELLA STRUMENTAZIONE DI MISURA DELLE VIBRAZIONI .....</b>	<b>38</b>

## 1. PREMESSA

### 1.1 *Scopo e campo di applicazione con sintesi delle opere previste*

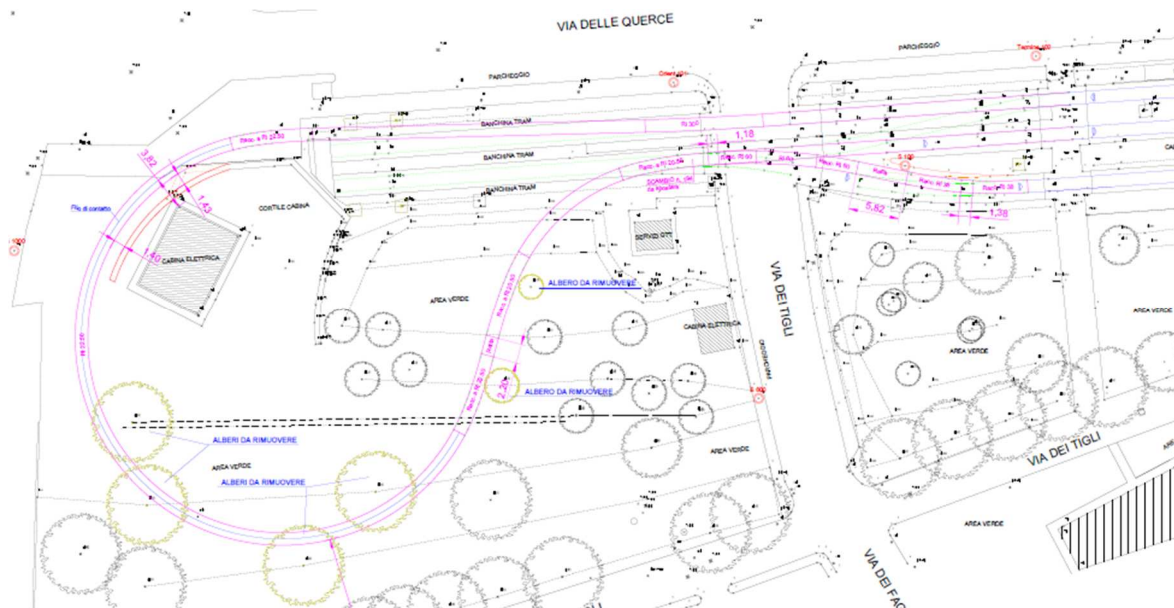
La presente relazione riporta i risultati dello studio previsionale d'impatto da vibrazioni finalizzato alla definizione delle migliori soluzioni progettuali utili per il contenimento del possibile disturbo da vibrazioni e da rumore indotto per via strutturale nell'ambito della progettazione di fattibilità tecnica ed economica del capolinea Falchera Linea 4 - GTT.



**Figura 1. Vista 3D dell'area di studio.**

La linea tranviaria 4, che attraversa tutta la città di Torino da nord a sud, presenta attualmente un capolinea nord in linea che sarà sostituito, nell'ambito degli interventi di potenziamento ed ampliamento della rete tranviaria, con un anello di ritorno in un'area adibita a verde pubblico prossima al capolinea attuale. Lo studio previsionale d'impatto da vibrazioni fa riferimento al futuro esercizio di questo specifico anello di ritorno utile per consentire alle nuove vetture monodirezionali di percorrere la linea 4 medesima.

Un estratto degli elaborati progettuali è riportato nella figura seguente:



**Figura 2. Estratto degli elaborati progettuali con in evidenza la nuova rotatoria.**

## 2. RIFERIMENTI NORMATIVI

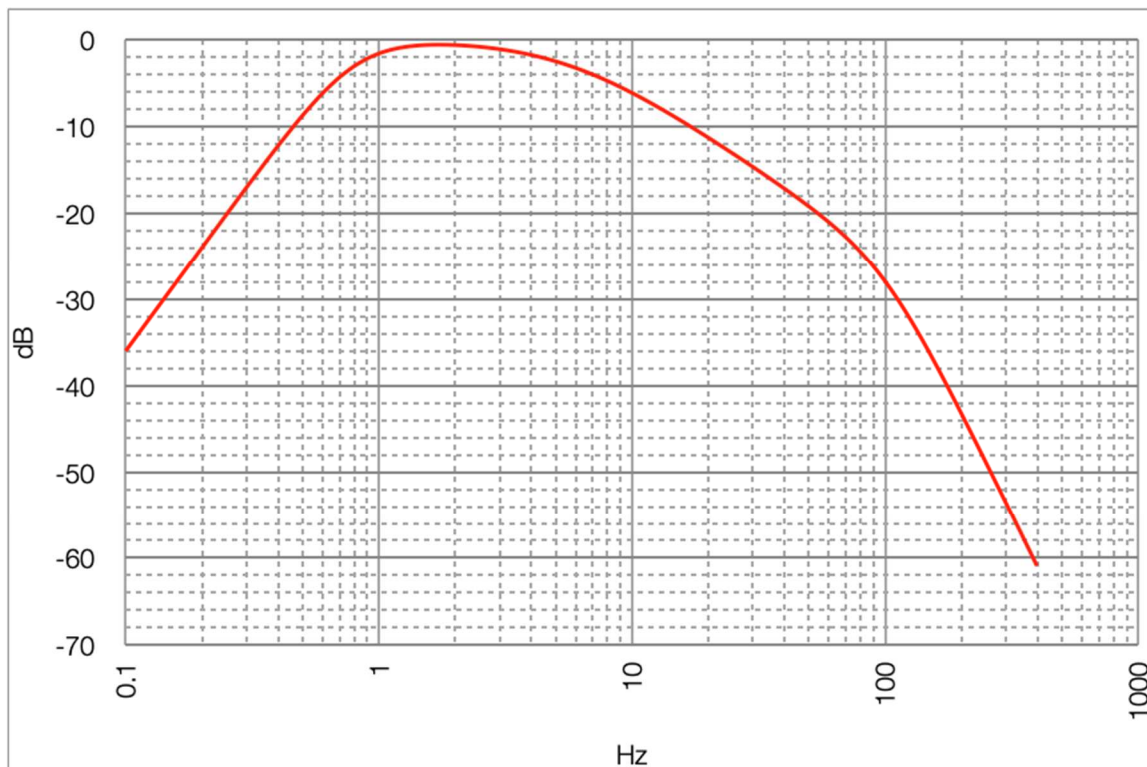
Diversamente da quanto riguarda la componente rumore, l’impatto da vibrazioni non è regolamentato da specifiche leggi in materia. Nell’ambito della normativa vigente in materia di inquinamento da vibrazioni, il presente studio fa riferimento alle seguenti norme tecniche:

- Norma UNI9614-2017 “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo”.
- Norma UNI9916-2014 “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici”.

Nei paragrafi seguenti si riportano alcune specificazioni sui principali aspetti delle citate norme tecniche.

### 2.1 Norma UNI9614-2017

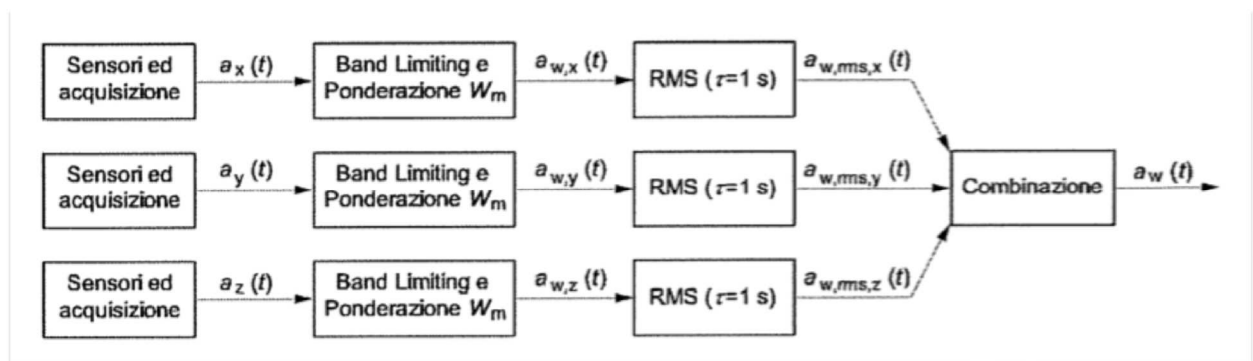
La norma UNI9614:2017 propone una metodologia di analisi dei fenomeni vibratorii basata sulla valutazione del valore massimo dell’accelerazione ponderata in frequenza secondo la curva di risposta del corpo umano denominata “Wm” e qui di seguito rappresentata nel grafico.



**Figura 3. Grafico della curva di pesatura  $W_m$  per la sensibilità umana alle vibrazioni**

L'analisi proposta dalla norma si basa sul concetto di "evento" vibratorio al quale viene associata la massima accelerazione ponderata - grandezza, questa, usata dalla norma come parametro descrittore degli eventi per tutti i fenomeni vibratori, anche per le vibrazioni stazionarie e per la vibrazione residua.

Le misurazioni devono essere eseguite in contemporanea sui 3 assi coordinati e successivamente analizzate e combinate secondo lo schema della figura seguente (estratto dal testo della norma).



Si procede poi prendendo la massima accelerazione per ognuno degli eventi scaturiti dalla combinazione dei 3 assi. Si avranno pertanto N valori di accelerazione massima ponderata, uno per ogni evento.

	TRANVIE DI TORINO – LINEA 4 Modifica capolinea Falchera con anello di ritorno <b>RELAZIONE</b>	Pag. 6 di 38
		REV. 00

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

Ed infine si ricava dagli N valori la massima accelerazione statistica

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

Dove la lettera greca sigma rappresenta lo scarto tipo della distribuzione delle massime accelerazioni ponderate.

Per la vibrazione residua si considerano i massimi relativi che occorrono durante una misurazione invece dei massimi assoluti come avviene invece nel caso degli eventi dei transiti di convogli. Per ricavare il valore dell'accelerazione attribuibile alla sorgente specifica analizzata si esegue infine l'operazione di "sottrazione quadratica" con la seguente formula

$$V_{sorgente} = \sqrt{V_{immissione}^2 - V_{residua}^2}$$

Il valore di  $V_{sorgente}$  così ottenuto deve essere confrontato con i limiti indicati dalla norma stessa per la tipologia di ambiente oggetto di analisi.

### 2.1.1 *Limiti di riferimento indicati dalla norma per le differenti tipologie di ricettori*

Per le abitazioni la norma specifica che i valori di accelerazione misurati e ponderati secondo quanto indicato dalla norma stessa non devono eccedere:

- 7.2mm/s<sup>2</sup> in periodo diurno
- 3.6mm/s<sup>2</sup> in periodo notturno
- 5.4mm/s<sup>2</sup> in periodo diurno per i giorni festivi

Per gli ospedali, case di cura ed assimilabili il valore limite indicato è pari a 2mm/s<sup>2</sup>.

Per asili e case di riposo il valore limite indicato è pari a 3.6mm/s<sup>2</sup>.

Per le scuole il valore limite indicato è pari a 5.4mm/s<sup>2</sup>.

## 2.2 **Norma UNI9916-2014**

La norma UNI 9916 analizza il tema "vibrazioni" sotto il profilo dei potenziali danni alle strutture edili ad esse correlabili. Per questo motivo la norma pone attenzione alla classificazione degli edifici e dei possibili danni, suddividendoli in danni architettonici e danni maggiori. Essa, tuttavia, si concentra soprattutto sulle modalità di posizionamento delle sonde vibrometriche e sulla esecuzione delle misurazioni di vibrazioni su edifici in concomitanza con la presenza delle sollecitazioni potenzialmente dannose.

La norma richiama anche – in appendice - criteri di valutazione derivanti da altre norme internazionali, tra cui la norma tedesca DIN 4150-3.

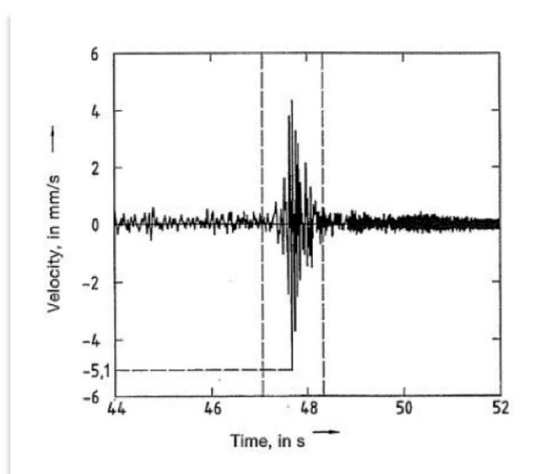
### 2.2.1 Indicazioni sulla modalità di valutazione delle vibrazioni

La metodologia di analisi del segnale da applicare per il caso di valutazione delle correlazioni tra vibrazioni e danni agli edifici prevede di confrontare i dati in termini di velocità di vibrazione.

Il parametro di riferimento è il p.c.p.v "peak component particle velocity" ovvero la velocità di picco rilevata lungo una componente (verticale o orizzontale). Esso deve essere confrontato con i limiti indicati nei prospetti della norma in corrispondenza della frequenza a cui l'analisi spettrale del segnale indica un massimo.

Nel caso di misurazione diretta di un segnale potenzialmente critico per l'edificio sotto indagine si opera secondo il seguente schema operativo:

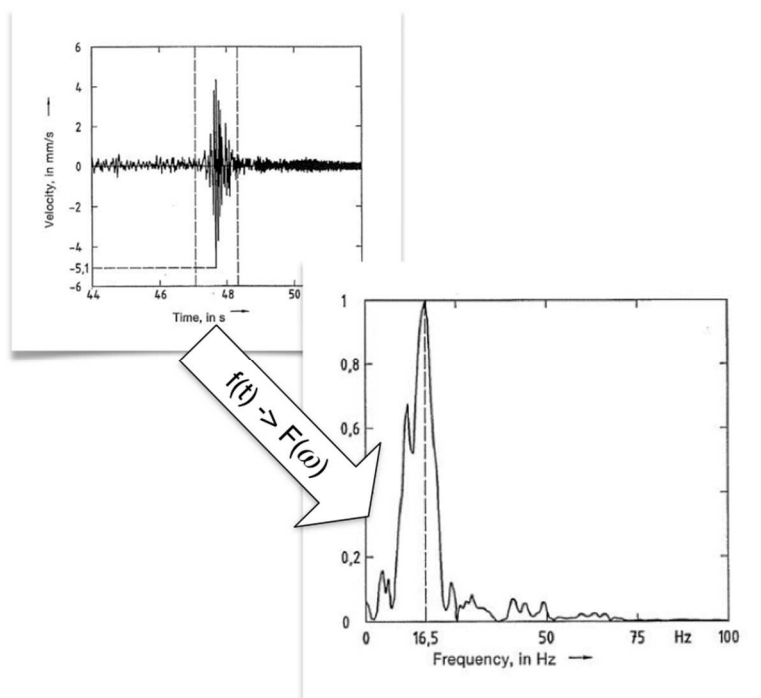
1. Integrazione del segnale da accelerazione a velocità (se la misurazione viene eseguita con accelerometri).
2. Individuazione del valore di picco massimo tra le componenti orizzontale e verticale.



**Figura 4. Individuazione del valore di picco sul tracciato del vibrogramma.**

3. Analisi spettrale del segnale nella banda di interesse (tipicamente 1Hz-100Hz) ed individuazione della frequenza in cui lo spettro presenta il valore massimo.





**Figura 5. Analisi spettrale ed individuazione della frequenza in cui lo spettro ha un massimo.**

4. Confronto tra valore di picco e valore limite indicato dalla norma, associando il valore di picco medesimo alla frequenza in cui lo spettro presenta il valore massimo (punto 3).

Se il valore misurato eccede il valore indicato dalla norma allora può presentarsi un nesso di causa-effetto tra vibrazioni ed eventuali fessurazioni, etc... In caso contrario non è possibile indicare tale nesso di causa-effetto.

### 2.2.2 Valori limite di riferimento

La norma UNI9916, per le vibrazioni di breve durata e comunque per quei fenomeni vibratorii che non hanno carattere di continuità e persistenza (così come accade per i transiti di convogli ferroviari o assibili), riporta nel proprio testo la seguente tabella di riferimento per i valori dei livelli di vibrazioni al di sotto dei quali non è possibile stabilire una correlazione diretta o un nesso di causa-effetto tra vibrazioni e danni alle strutture.

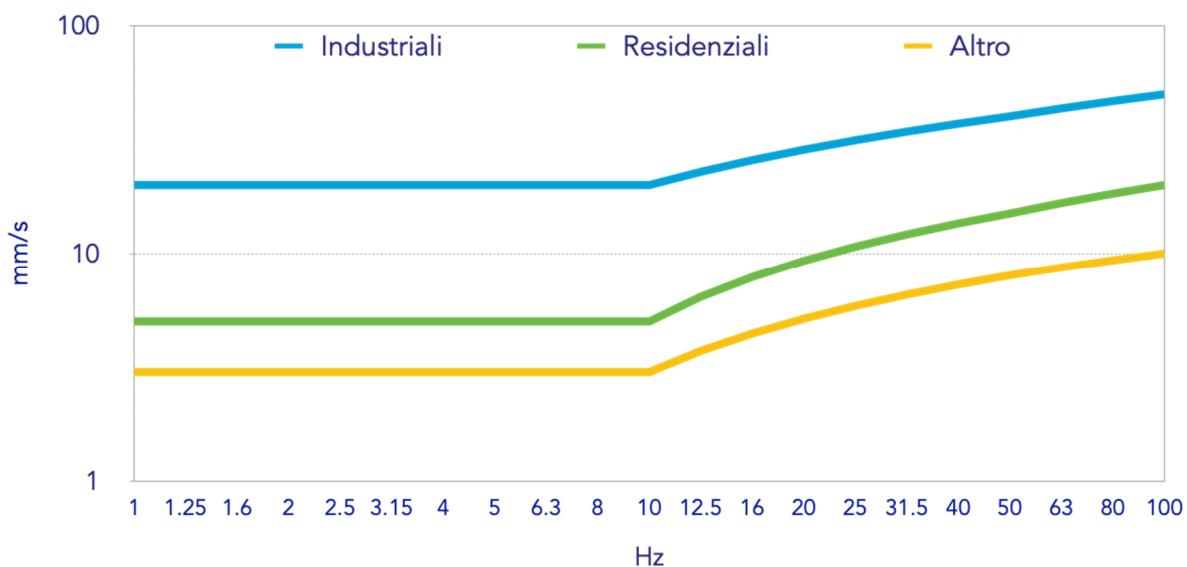
Classe	Tipo di edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s				
		Fondazioni			Piano alto	Solai Componente Verticale
		Da 1 Hz a 10 Hz	Da 10 Hz a 50 Hz	Da 50 Hz a 100 Hz <sup>1)</sup>	Per tutte le frequenze	Per tutte le frequenze
1	Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili	20	Varia linearmente da 20 ( $f=10$ Hz) a 40 ( $f=50$ Hz)	Varia linearmente da 40 ( $f=50$ Hz) a 50 ( $f=100$ Hz)	40	20
2	Edifici residenziali e costruzioni simili	5	Varia linearmente da 5 ( $f=10$ Hz) a 15 ( $f=50$ Hz)	Varia linearmente da 15 ( $f=50$ Hz) a 20 ( $f=100$ Hz)	15	20
3	Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)	3	Varia linearmente da 3 ( $f=10$ Hz) a 8 ( $f=50$ Hz)	Varia linearmente da 8 ( $f=50$ Hz) a 10 ( $f=100$ Hz)	8	3/4

<sup>1)</sup> Per frequenze oltre 100 Hz possono essere usati i valori di riferimento per 100 Hz.

**Figura 6. Valori di riferimento per la velocità di vibrazione**

I valori indicati nella tabella sono riportati graficamente nel diagramma seguente.

**Massima p.c.p.v. alla base dell'edificio**



**Figura 7. Grafico dei valori limite di riferimento per le vibrazioni.**

**2.3 Approccio metodologico generale alla valutazione previsionale d’impatto da vibrazioni e rumore indotto per via strutturale**

Sulla base delle indicazioni delle norme tecniche di riferimento è stata predisposta una metodologia di analisi dei dati e delle informazioni a disposizione per poter procedere ad una stima previsionale degli effetti delle emissioni di vibrazioni per lo scenario di esercizio della nuova rotatoria.

Scopo dello studio è duplice:

	TRANVIE DI TORINO – LINEA 4 Modifica capolinea Falchera con anello di ritorno <b>RELAZIONE</b>	Pag. 10 di 38
		REV. 00

- 1) Fornire una stima di massima (a livello di ordine di grandezza) relativamente alle potenziali criticità espresse in termini di:
  - Rumore indotto per via strutturale negli edifici
  - Disturbo vibrotattile (inteso come percezione “corporale” delle vibrazioni)
  - Possibili correlazioni tra vibrazioni e “danni estetici” alle strutture edili
  
- 2) Fornire elementi ed indicazioni utili per un primo dimensionamento delle prestazioni di eventuali dispositivi e supporti antivibranti al fine di perseguire la conformità delle emissioni con riferimento alle 3 tematiche sopra citate.

Le fasi del percorso metodologico seguito per perseguire gli scopi sopra esposti possono essere così riassunte:

- a) Analisi del progetto ed individuazione dei ricettori di riferimento (in associazione ed analogia con lo studio previsionale d’impatto acustico)
- b) Indagine tecnica sulle modalità di propagazione delle vibrazioni dal sito del futuro sedime ferrotranviario verso il ricettore più vicino e sulla vettura tranviaria di previsto impiego.
- c) Analisi del territorio con riferimento alla natura del terreno (rif. sondaggi e studi geotecnici).
- d) Esecuzione dei calcoli di stima previsionale della propagazione delle vibrazioni verso il ricettore più vicino sulla base dei dati precedentemente acquisiti e di spettri di vibrazione di riferimento per la tipologia di vettura tranviaria di previsto impiego.

#### ***2.4 Nota a riguardo delle stime previsionali in materia di vibrazioni e di rumore indotto per via strutturale***

Come precedentemente specificato, il presente lavoro è sviluppato al fine di fornire indicazioni ed elementi utili a stimare il grado di potenziale criticità in materia di vibrazioni e di rumore indotto per via solida verso le abitazioni.

Diversamente da quanto accade per la componente rumore, per la quale sono disponibili modelli di calcolo acustico previsionale normati e consolidati da molteplici esperienze e riscontri sul campo, per lo sviluppo di calcoli previsionali in materia di vibrazioni non sono disponibili modelli di calcolo di qualità altrettanto elevata ed adeguati a fornire una stima previsionale con un ragionevole e, soprattutto, quantificabile grado di incertezza.

Per quanto riguarda la propagazione delle vibrazioni nel terreno, sono disponibili in letteratura indicazioni relative a modellizzazioni teoriche che necessitano di una serie di numerose ipotesi semplificative per poter essere applicati nella pratica.

Per quel che concerne la propagazione delle vibrazioni dal terreno alle strutture edili sono parimenti disponibili in letteratura indicazioni di massima per tenere conto dell’accoppiamento suolo fondazioni ma è chiaro che ogni edificio, per la sua tipicità costruttiva, può costituire un caso a sé stante.

Lo schema a blocchi generale dei modelli di previsione per la propagazione delle vibrazioni può essere così rappresentato:



**Figura 8. Schema a blocchi di applicazione di un modello previsionale per le vibrazioni.**

Per le vibrazioni generate in superficie – come nel caso del presente lavoro da parte delle vetture tranviarie - numerosi autori in letteratura<sup>1</sup> propongono un modello che tiene conto della attenuazione geometrica in funzione della distanza e della attenuazione per dissipazione del terreno. Questo nell'ipotesi che non siano presenti, nel terreno oggetto di analisi, forti ed improvvise discontinuità nella densità del medesimo e nella sua conformazione, poiché si tratta di terreno analizzato in superficie.

Esso può essere così espresso in termini logaritmici:

$$L(r) = L_0 + 10 \text{Log}_{10} \left( \frac{d_0}{r} \right) - 20 \text{Log}_{10} \left( e \right) \frac{2\pi f \eta}{c} (r - d_0)$$

Dove:

$L(r)$  = Livello di accelerazione alla distanza  $r$

$r$  = distanza di interesse alla quale si desidera conoscere la stima del livello di accelerazione

$L_0$  = livello di accelerazione alla distanza  $d_0$  di riferimento

$\eta$  = fattore di perdita per dissipazione del terreno

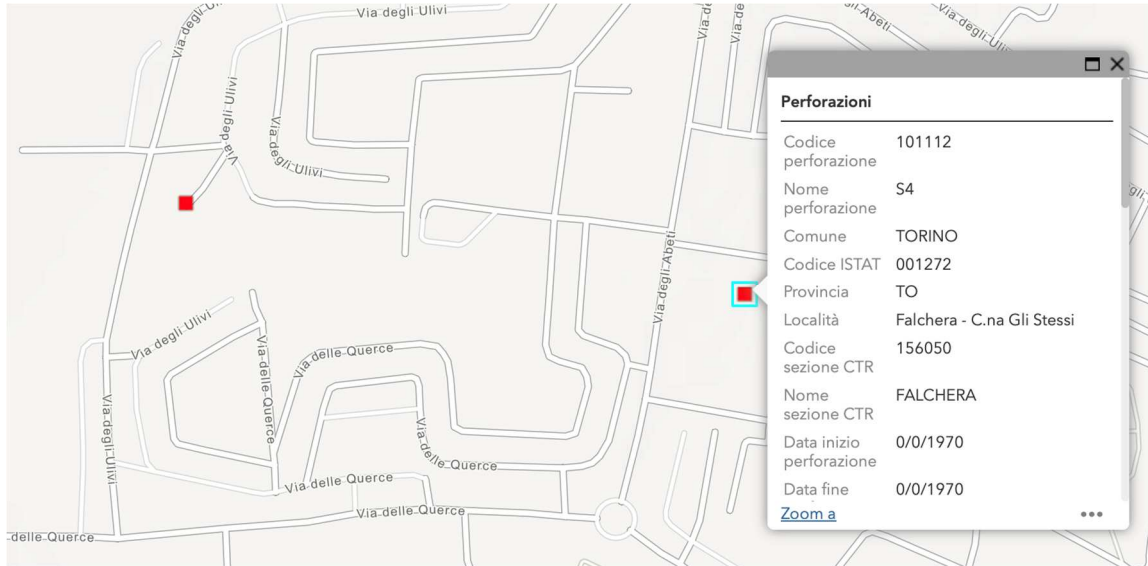
$c$  = velocità di propagazione delle vibrazioni nel terreno.

Poiché nel caso specifico del presente lavoro si è in presenza di un singolo edificio ricettore, si è preferito comunque procedere a rilevazioni dirette su di esso per caratterizzarne la risposta alle sollecitazioni vibratorie e così anche per la caratterizzazione della propagazione nel terreno antistante.

<sup>1</sup> Rudder, Pisani ed altri.

### 3. ANALISI DEL TERRITORIO DELLA BORGATA FALCHERA

Informazioni sulla natura del terreno utili per la stima sulle sue proprietà meccaniche di trasmissione dei segnali vibrazionali sono reperibili dalla banca dati geotecnica della Regione Piemonte (ARPA), resa disponibile nell’ambito del database cartografico regionale e liberamente consultabile in rete. Esse si presentano sotto forma di descrizioni stratigrafiche georiferite come quella qui di seguito riportata a titolo di esempio.



Nome perforazione	Comune	Provincia	Località
S4	TORINO	TO	Falchera - C.na Gli Stessi
Data inizio perforazione	Data fine perforazione	Profondità (m)	Cantiere
0/0/1970	0/0/1970	8.00	Edilizia: IACP Torino - La Falchera

Codice perforazione	Profondità (m)	Descrizione
101112	0.90	terreno vegetale
101112	8.00	sabbia e ghiaia

**Figura 9. Estratto delle analisi del sottosuolo della banca dati geotecnica dell’ARPA Piemonte.**

Le analisi rese disponibili concordano nell’indicare come il terreno – nelle parti interessate dal progetto – sia principalmente costituito da strati ghiaiosi/sabbiosi.

Sulla base di queste analisi è stata pertanto individuata ed adottata come tipologia generale di terreno quella avente natura sabbioso/ghiaiosa. Ad essa corrispondono una velocità di propagazione delle onde

vibrazionali pari a circa 600m/s ed un fattore di perdita (indicativo della dissipazione dell'energia nel terreno) dell'ordine di grandezza di  $\eta \approx 0.1$  <sup>2</sup>

**Tabella 1 Richiamo della tabella contenente le caratteristiche dei diversi terreni**

Tipo di terreno	Velocità di propagazione per onda longitudinale m/s	Fattore di perdita $\eta$	Massa volumica $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Roccia	3500	0.01	2.65
Sabbia	600	0.10	1.60
Argilla	1500	0.50	1.70

Nel caso del presente lavoro, alla caratterizzazione generale del terreno della zona si affianca la possibilità di caratterizzare direttamente con misure in campo la modalità di propagazione delle vibrazioni dal tracciato tranviario all'edificio ed anche verso i piani superiori dell'edificio stesso.

<sup>2</sup> Da R.Pisani - "Origine, propagazione e modelli previsionali delle vibrazioni dei mezzi di trasporto" ed altri.

	TRANVIE DI TORINO – LINEA 4 Modifica capolinea Falchera con anello di ritorno <b>RELAZIONE</b>	Pag. 14 di 38
		REV. 00

#### 4. RILIEVI DI VIBRAZIONI E RISULTATI CONSEGUITI

In occasione del presente lavoro sono state eseguite misurazioni di vibrazioni specificamente orientate a:

- 1) Acquisire dati ed informazioni utili a caratterizzare gli spettri di emissione di vibrazioni relativi alle nuove vetture tranviarie della serie 8000.
- 2) Acquisire dati ed informazioni relative alle modalità di propagazione delle vibrazioni dal sito di futura realizzazione della rotonda del nuovo capolinea verso l'edificio ricevente più vicino.

##### 4.1 *Misurazioni di vibrazioni per la caratterizzazione delle emissioni delle nuove vetture serie 8000*

Le nuove vetture serie 8000 che saranno impiegate lungo il tracciato della linea 4 percorreranno la rotonda del capolinea in progetto in località Falchera. La rotonda avrà raggio pari a 22,5m e, pertanto, nel transitare di fronte all'edificio ricevente, le vetture saranno impegnate nel percorrere una curva di questo specifico raggio.

Per questo motivo è stata individuata nella rete tranviaria torinese una curva di analoghe caratteristiche – situata in Piazzale Caio Mario – e le misurazioni di vibrazioni sono state eseguite utilizzando una vettura di test della serie 8000 proprio nella curva individuata come assimilabile a quella in progetto.



**Figura 10.      Transito della vettura 8009 lungo la curva di Piazzale Caio Mario.**

I test hanno consentito di acquisire direttamente sul campo una serie di dati di caratterizzazione delle emissioni di vibrazioni a 2 diverse distanze dalla linea: 2m e 15m.

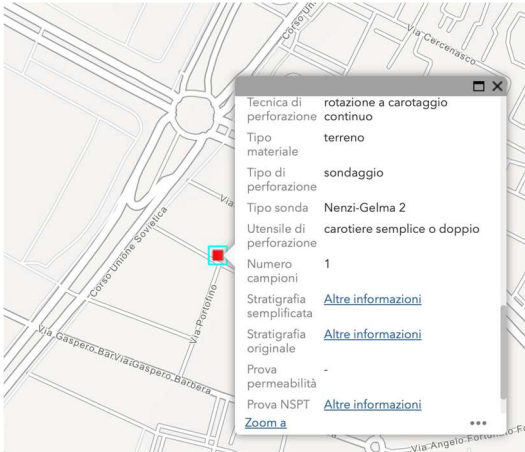
Qui di seguito sono riportate le immagini fotografiche delle terne accelerometriche installate rispettivamente a 2m e 15m di distanza dal binario.



**Figura 11. Postazioni accelerometriche alle distanze di 2m e 15m dal binario.**

I dati acquisiti alla distanza di 2m – immediatamente all’esterno della sede tranviaria – possono essere considerati come rappresentativi della emissione di vibrazioni verso il terreno adiacente al massetto tranviario (qui privo di qualsiasi dispositivo antivibrante); i dati acquisiti alla distanza di 15m possono essere considerati come una indicazione di massima della vibrazione che potrà giungere all’edificio ricettore di via dei Tigli 14-18 situato a 22m di distanza dalla futura rotatoria del capolinea in una diversa zona della città.

*Nota: anche il terreno della zona del Piazzale Caio Mario ha natura principalmente sabbioso-ghiaiosa (si veda la figura seguente estratta dal database geotecnico di ARPA Piemonte) così come il terreno presente in via dei Tigli.*





Nome perforazione	Comune	Provincia	Località
S1	TORINO	TO	Via Portofino, angolo via Imperia in Torino
Data inizio perforazione	Data fine perforazione	Profondità (m)	Cantiere
21/11/1997	21/11/1997	15.00	P.R.G.C. di TO area 16.23

Codice perforazione	Profondità (m)	Descrizione
1275	0.60	riporto sabbioso ghiaioso
1275	1.50	limo sabbioso consistente
1275	2.60	sabbia e ghiaia limosa mediamente ossidata alterata moderatamente addensata con rari elementi lapidei
1275	5.00	ghiaia ciottolosa con sabbia debolmente limosa ben addensata e/o debolmente cementata
1275	6.00	sabbia ghiaiosa moderatamente addensata ossidata con presenza di elementi lapidei debolmente alterati
1275	6.90	sabbia ghiaiosa limosa moderatamente addensata ossidata con presenza di elementi lapidei debolmente alterati
1275	9.00	ghiaia ciottolosa sabbiosa debolmente limosa addensata
1275	9.80	ghiaia eterometrica limosa sabbiosa ossidata e debolmente alterata addensata
1275	10.50	ghiaia eterometrica sabbiosa debolmente limosa con ciottoli ben addensata e/o cementata con livelli di limo

**Figura 12. Estratto delle analisi del sottosuolo della banca dati geotecnica dell'ARPA Piemonte per l'area di test di Piazzale Caio Mario.**

#### 4.1.1 Risultati dei rilievi dei transiti delle vetture serie 8000 lungo la curva di Piazzale Caio Mario

I test di percorrenza della curva di Piazzale Caio Mario – avente medesimo raggio di curvatura di quella di prevista realizzazione al capolinea della linea 4 in borgata Falchera - sono stati eseguiti con la vettura n.8009 nella giornata del 6/3/2024.

Le misurazioni sono state eseguite per mezzo di strumentazione multicanale B&K Pulse 3050-A-060 a 6 canali. Due terne accelerometriche sono state collocate e rigidamente fissate sul terreno alle distanze di 2m e 15m dal binario.

I test sono stati svolti richiedendo al conduttore della vettura di eseguire transiti ripetuti lungo la curva a differenti velocità di percorrenza comprese tra i 5Km/h ed i 25Km/h. Al di sopra di 25Km/h il transito non è possibile per motivi di sicurezza.

I risultati dei rilievi eseguiti in concomitanza dei singoli transiti – analizzati secondo le indicazioni della norma UNI9614-2017 – forniscono i seguenti risultati in termini di "V<sub>sorgente</sub>" parametro attribuibile al contributo del solo evento di "transito della vettura" depurato dalla vibrazione di fondo.

**Tabella 2: Risultati delle misurazioni di test con transiti della vettura 8009 a diverse velocità**

Velocità transito [Km/h]	Dati misurati P.zale Caio Mario		Dati depurati dalla vib. di fondo		Limite abitazioni notte [m/s <sup>2</sup> ]
	[m/s <sup>2</sup> ] - d=2m	[m/s <sup>2</sup> ] - d=15m	[m/s <sup>2</sup> ] - d=2m	[m/s <sup>2</sup> ] - d=15m	
25	2,94E-02	3,62E-03	2,91E-02	3,35E-03	3,60E-03
25	3,04E-02	4,17E-03	3,01E-02	3,95E-03	
22	2,80E-02	3,48E-03	2,77E-02	3,21E-03	
20	2,37E-02	3,20E-03	2,33E-02	2,90E-03	
20	2,21E-02	3,11E-03	2,17E-02	2,80E-03	
15	1,83E-02	2,81E-03	1,78E-02	2,47E-03	
15	2,00E-02	3,03E-03	1,95E-02	2,71E-03	
10	1,16E-02	3,14E-03	1,07E-02	2,83E-03	
10	1,28E-02	2,53E-03	1,20E-02	2,14E-03	
5	1,01E-02	2,70E-03	9,05E-03	2,34E-03	
5	1,39E-02	2,78E-03	1,32E-02	2,43E-03	
25	2,36E-02	3,65E-03	2,32E-02	3,40E-03	
Vib. di fondo	4,43E-03	1,35E-03	--	--	

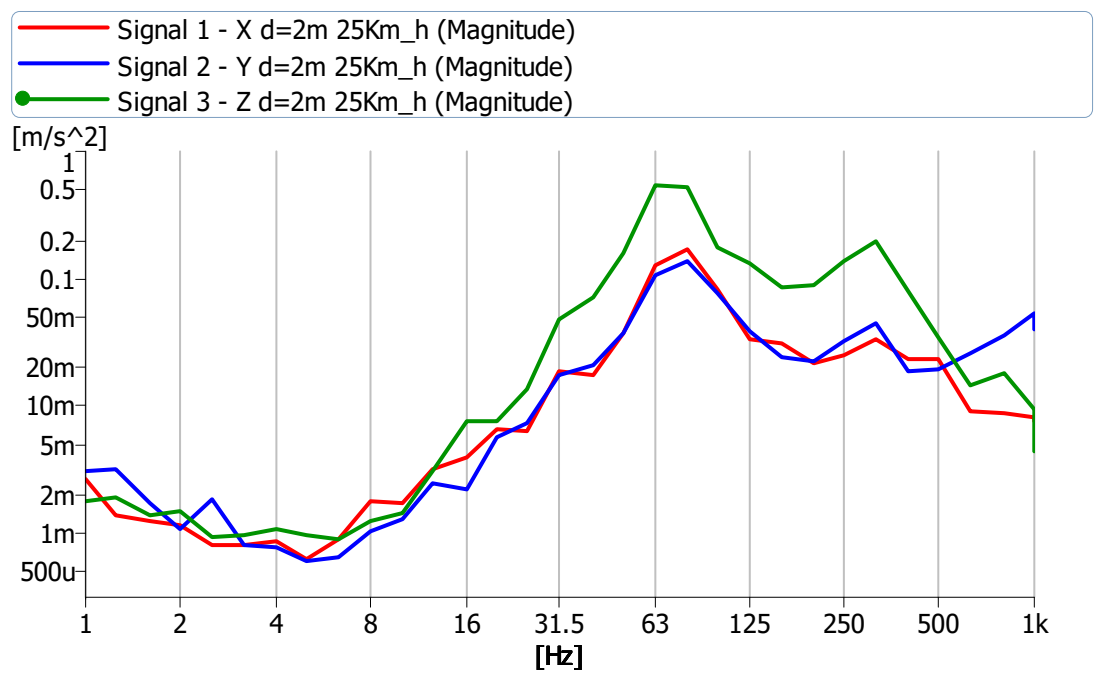
Dai risultati è possibile osservare come alla distanza di 15m l'accelerazione si attesti su valori prossimi al limite per le abitazioni in periodo notturno in occasione dei transiti a maggiore velocità (25Km/h) con superamento del limite in un singolo caso. A velocità ridotta la vibrazione risulta inferiore e potenzialmente conforme ai valori indicati dalla norma UNI9614:2017 ancorché misurati sul terreno e non in appartamento.

Ovviamente i risultati alla distanza di 2m sono superiori di un ordine di grandezza rispetto a quelli a 15m e costituiscono il riferimento tecnico per il calcolo previsionale nel sito di via dei Tigli.

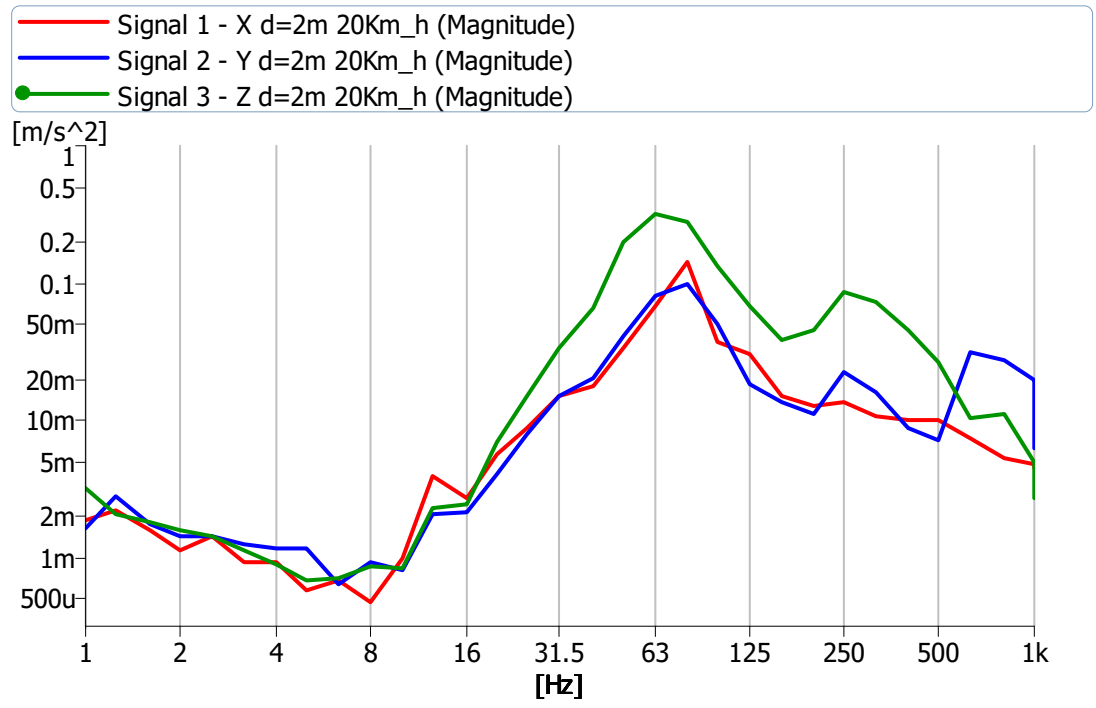
#### 4.1.2 Spettro di vibrazione di riferimento per la sorgente "transito della vettura serie 8000".

Le misurazioni eseguite a 2m di distanza dal binario hanno consentito di acquisire informazioni in funzione della frequenza relativamente ai transiti delle vetture serie 8000 a diverse velocità. Gli spettri di accelerazione qui acquisiti possono essere utilizzati come dati di input per la stima previsionale delle vibrazioni sul ricettore di via dei Tigli 14-18.

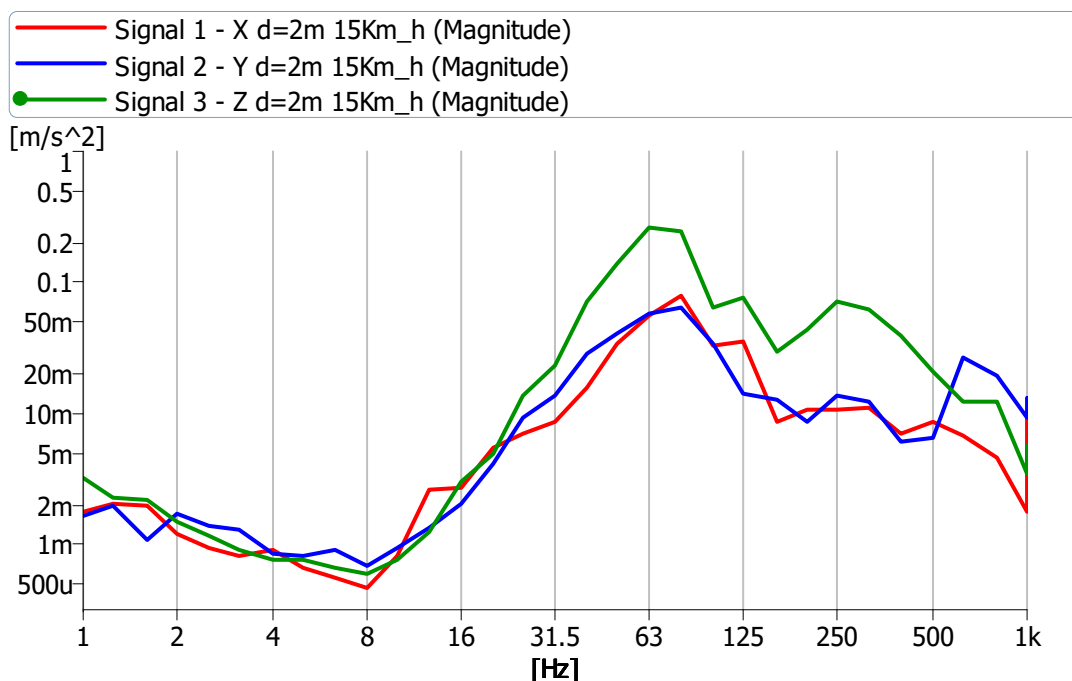
Gli spettri acquisiti sono qui di seguito riportati per bande di 1/3 d'ottava da 1Hz a 1000Hz in forma grafica e privi di pesatura  $W_m$  (curva di risposta del corpo umano) giacché sono da utilizzarsi anche in funzione della stima della rumorosità potenzialmente inducibile per via strutturale.



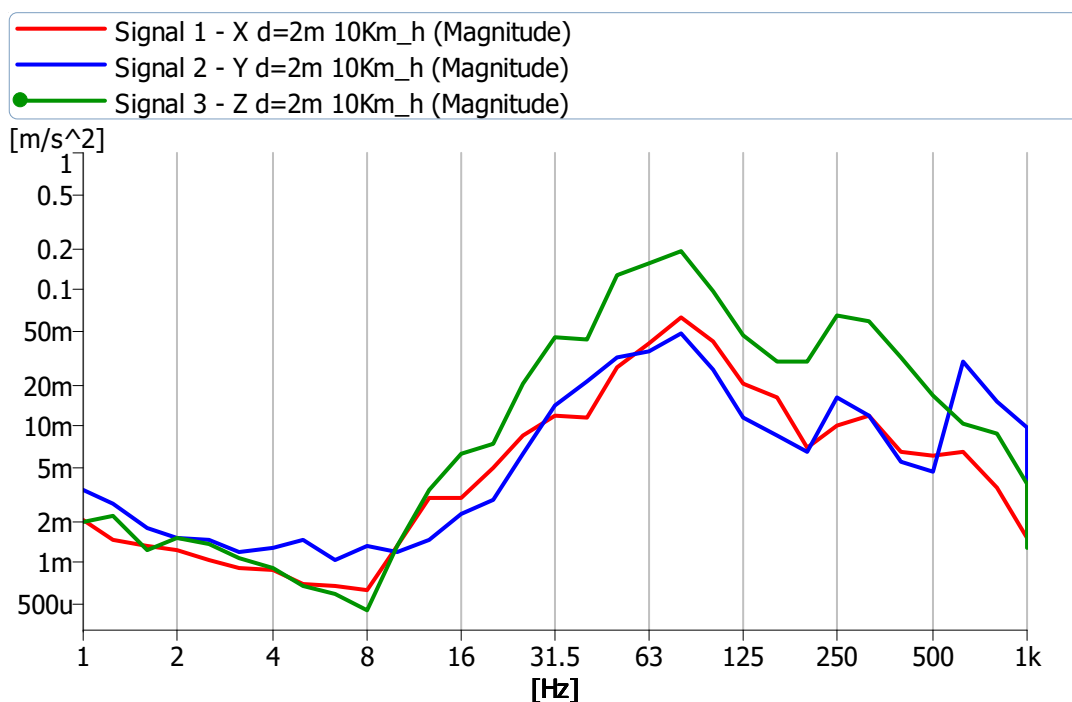
**Figura 13. Spettro CPB per 1/3 d’ottava dell’accelerazione misurata a 2m di distanza dal binario in concomitanza con il transito della vettura 8009 a 25Km/h.**



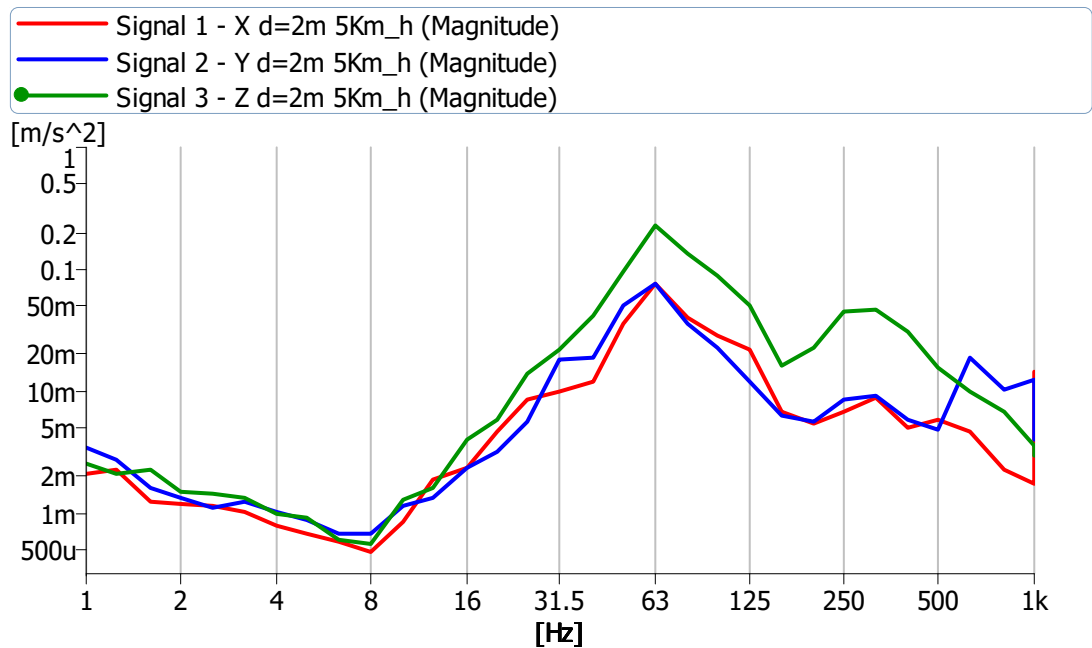
**Figura 14. Spettro CPB per 1/3 d’ottava dell’accelerazione misurata a 2m di distanza dal binario in concomitanza con il transito della vettura 8009 a 20Km/h.**



**Figura 15. Spettro CPB per 1/3 d’ottava dell’accelerazione misurata a 2m di distanza dal binario in concomitanza con il transito della vettura 8009 a 15Km/h.**



**Figura 16. Spettro CPB per 1/3 d’ottava dell’accelerazione misurata a 2m di distanza dal binario in concomitanza con il transito della vettura 8009 a 10Km/h.**



**Figura 17. Spettro CPB per 1/3 d’ottava dell’accelerazione misurata a 2m di distanza dal binario in concomitanza con il transito della vettura 8009 a 5Km/h.**

**4.2 Note sulla metodologia d’indagine sulle strutture edili**

Al fine di ottenere informazioni relative al comportamento delle strutture edili quando sollecitate da energia meccanica proveniente dal terreno si è provveduto ad eseguire rilevazioni di vibrazioni con metodo impulsivo.

Questa tecnica si basa sulla identificazione della struttura oggetto di studio con un sistema dinamico lineare tempo-invariante. Ogni sistema di questo tipo risponde a sollecitazioni esterne (input) con una oscillazione (output) che dipende dall’input (ovviamente) e dalle caratteristiche dinamiche della struttura (quelle oggetto di indagine).



Per ricavare al meglio le informazioni di interesse – ovvero le caratteristiche dalla risposta dinamica dell’edificio che dipende unicamente dalle sue caratteristiche e non dal segnale di input immesso per poterla sollecitare – è possibile utilizzare un segnale di tipo impulsivo poiché ad esso introduce idealmente nel sistema una uguale quantità di energia alle diverse frequenze (cosiddetto spettro “piatto”).

È chiaro dunque che, se il sistema è sollecitato idealmente con uguale energia a tutte le diverse frequenze, il profilo spettrale che viene misurato nei punti di arrivo del segnale (pavimenti in appartamento) dipenderà unicamente dal comportamento della struttura che – in base alle proprie caratteristiche – avrà determinato una diversa attenuazione (o talvolta addirittura amplificazione) del segnale per ogni diversa frequenza.

	TRANVIE DI TORINO – LINEA 4 Modifica capolinea Falchera con anello di ritorno <b>RELAZIONE</b>	Pag. 21 di 38 <hr/> REV. 00
---	--	--------------------------------

In termini reali lo spettro del segnale di input e la limitata energia che si riesce ad introdurre sugli edifici senza creare danni con la massa battente consentono di sollecitare le strutture edili solamente a partire dalle frequenze di 5-8Hz in su e, pertanto, le informazioni ricavate sono rappresentative delle caratteristiche dinamiche dell'edificio solo al di sopra di esse.

Per ricavare poi la risposta in frequenza dell'edificio tra il piano terra e gli appartamenti si esegue il rapporto tra la porzione di segnale linearmente dipendente dal segnale di input rilevato al punto di output con quello misurato in vicinanza del punto di impatto della massa battente. Tale operazione – nota in analisi del segnale come FRF (Frequency Response Function) – viene eseguita operando il rapporto tra il cross spettro delle funzioni di output ed input e l'autospettro della funzione di input. Per questo motivo è necessario acquisire i segnali in contemporanea su tutti i punti di indagine con strumentazione multicanale. Il risultato finale viene infine restituito come spettro per bande di 1/3 d'ottava per comodità di utilizzo nel prosieguo delle elaborazioni.



**Figura 18.** Fotografia scattata all'esterno dell'edificio (punto di impatto per la generazione del segnale impulsivo)

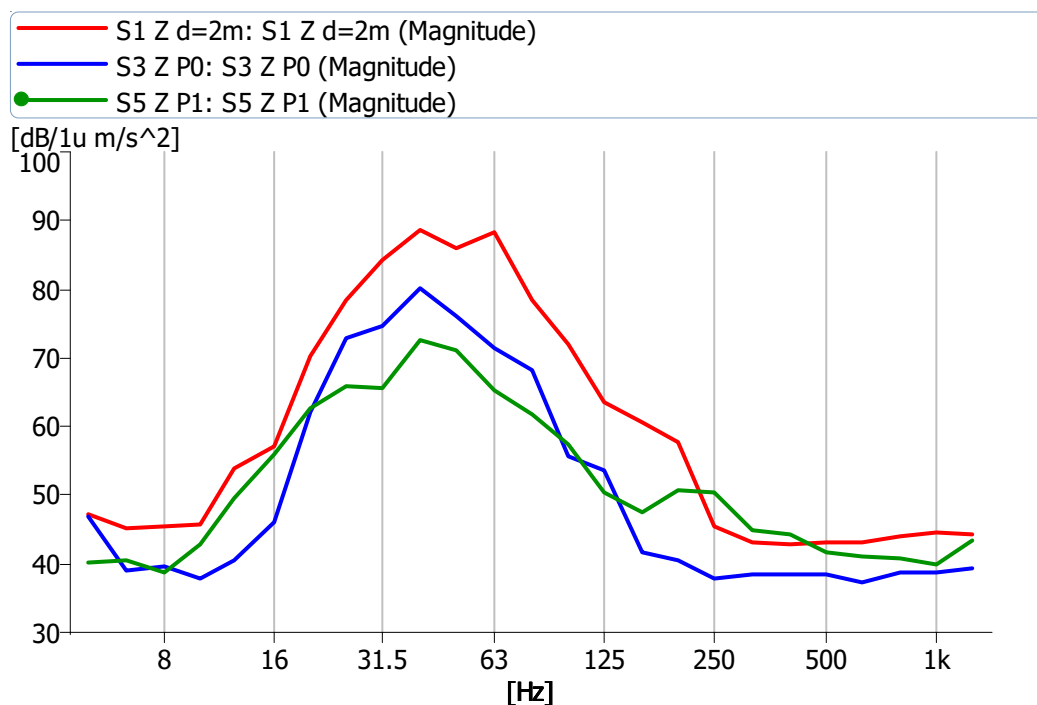
#### ***4.3 Risultati dei rilievi di vibrazioni per la verifica delle proprietà di trasmissione nel terreno e sull'edificio ricettore***

In occasione delle misurazioni eseguite presso l'edificio di via dei Tigli 14-18 è stato messo a disposizione anche lo spazio antistante l'edificio, fin verso il sito di futura realizzazione della rotatoria del capolinea. È stato così possibile eseguire misurazioni in funzione della distanza da un punto di impatto della massa battente sul terreno corrispondente al sito di prevista realizzazione del massetto tranviario. Le misurazioni sono state eseguite in contemporanea anche presso la base dell'edificio ed i piani superiori così da poter acquisire dati in simultanea e valutare la propagazione della vibrazione lungo il "sistema" terreno+edificio fino agli ambienti abitativi.

Il tracciato temporale (cosiddetto oscillogramma) dei segnali rilevati in contemporanea e corrispondenti agli impulsi della massa battente sono del tipo rappresentato nella seguente figura:

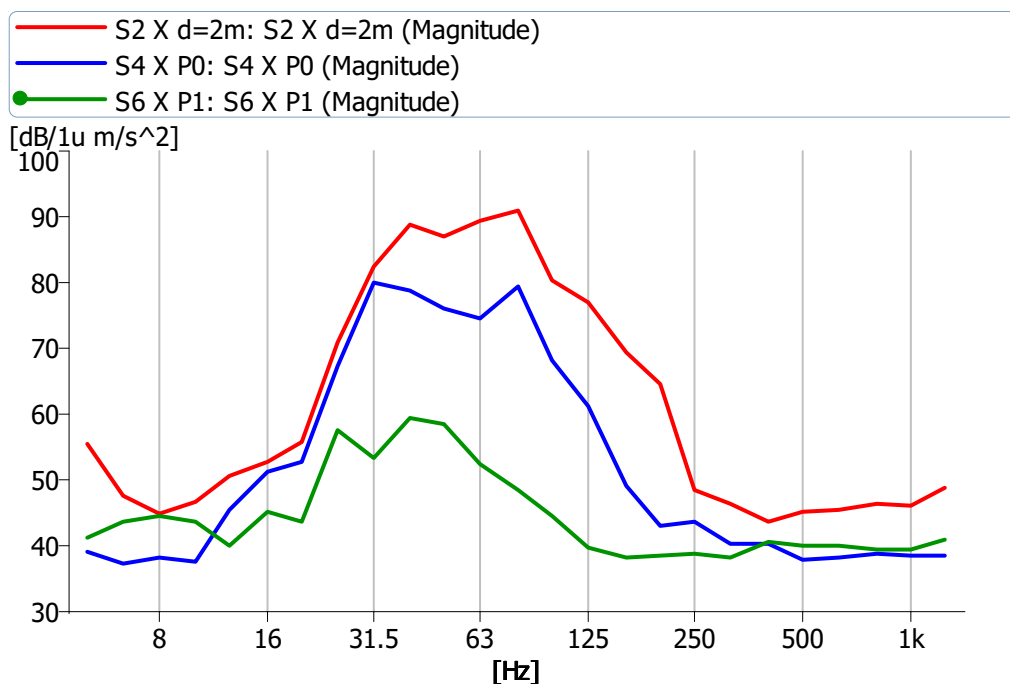


**Figura 19. Oscillogramma impulsivo in occasione di una misurazione**

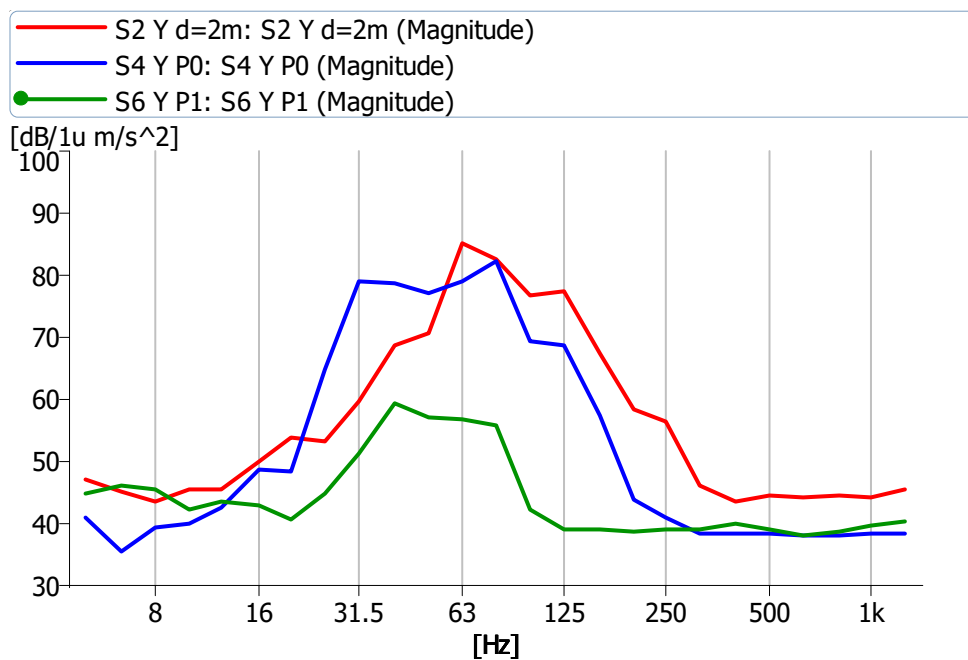


**Figura 20. Grafico di sintesi degli spettri misurati presso zona di futuro transito, alla base dell'edificio ed al primo piano (asse verticale)**





**Figura 21.** Grafico di sintesi degli spettri misurati presso zona di futuro transito, alla base dell'edificio ed al primo piano (asse trasversale)

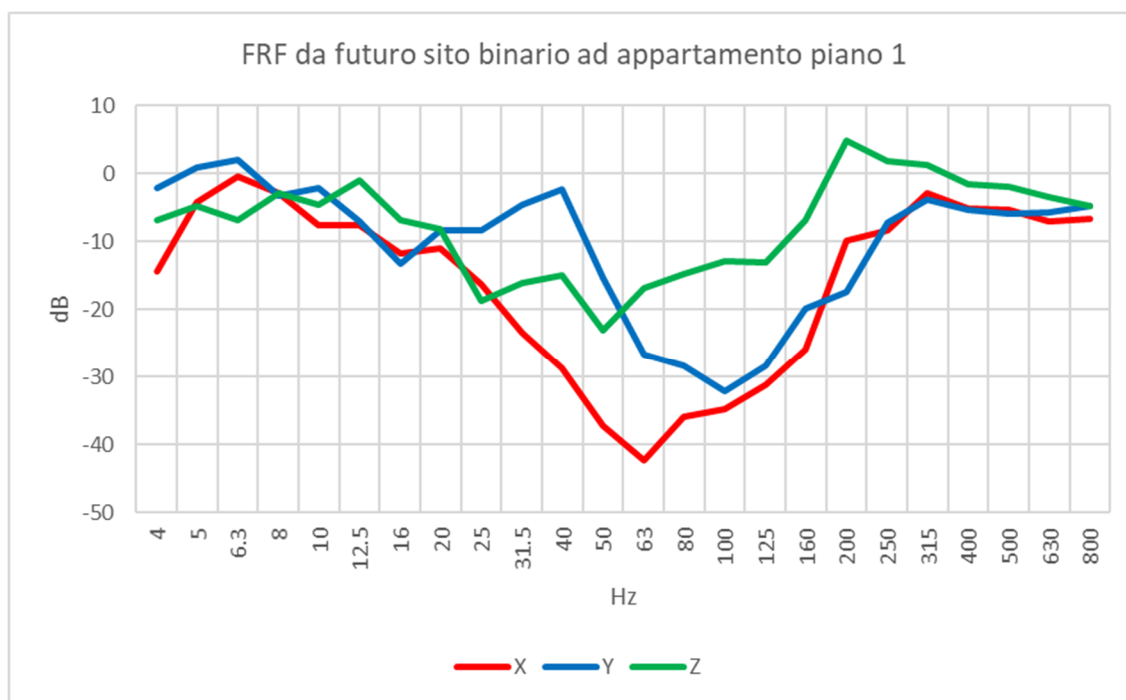


**Figura 22.** Grafico di sintesi degli spettri misurati presso zona di futuro transito, alla base dell'edificio ed al primo piano (asse longitudinale)



**Figura 23. Fotografie relative alle postazioni di misura accelerometrica studiate in appartamento ed alla base dell'edificio**

Il grafico riportato nei paragrafi seguenti sintetizza le risposte alle sollecitazioni vibrazionali (FRF) rilevate.



**Figura 24. Risposta in frequenza dal punto di impatto presso il futuro binario al primo piano dell'edificio – asse verticale**

Nota: alle frequenze più basse (al di sotto dei 10Hz) la FRF ha valenza indicativa giacché la sollecitazione della massa battente a tali frequenze è lieve.

	TRANVIE DI TORINO – LINEA 4 Modifica capolinea Falchera con anello di ritorno <b>RELAZIONE</b>	Pag. 26 di 38
		REV. 00

## 5. VALUTAZIONE PREVISIONALE DELL'IMPATTO DA VIBRAZIONI AL TRANSITO DELLE VETTURE TRANVIARIE

### 5.1 Orari di previsto funzionamento dell'infrastruttura in fase di esercizio

Gli orari previsti di esercizio della tranvia restano quelli attualmente in vigore sia relativamente al periodo di riferimento diurno sia relativamente a quello notturno.

Per questo motivo, ai fini della definizione dei limiti normativi, si considera come riferimento il periodo notturno – a cui corrispondono limiti più restrittivi.

### 5.2 Risultati della valutazione previsionale

#### 5.2.1 Definizione dell'obiettivo acustico di progetto per lo scenario di esercizio relativamente al rumore indotto per via strutturale.

Anche se la percepibilità del rumore costituisce un elemento soggettivo la cui valutazione esula dal presente studio, la vigente normativa amministrativa in materia di acustica considera una immissione di rumore inferiore a 25dB in periodo notturno come "non disturbante". Il DPCM 14/11/1997 indica infatti tale valore come soglia di applicabilità del limite differenziale di immissione sonora a finestre chiuse in periodo notturno, indicando esplicitamente come – ai fini dell'accettabilità amministrativa del rumore – in presenza di livelli di rumore ambientale a finestre chiuse in periodo notturno nelle abitazioni il limite differenziale di immissione sonora non si applichi in quanto "ogni effetto del rumore è da ritenersi trascurabile".

Ancorché il limite differenziale di immissione sonora NON si applichi alla rumorosità derivante dalle infrastrutture di trasporto e l'unico riferimento legislativo per la rumorosità "indoor" sia contenuto nel DPR 18/11/98 n.459 "Regolamento recante norme di esecuzione dell'articolo 11 della legge 26 ottobre 1995, n. 447, in materia di inquinamento acustico derivante da traffico ferroviario" che all'art.4 comma 5 così recita:

*"...omissis... deve essere assicurato il rispetto dei seguenti limiti:*

- a) 35 dB(A) Leq notturno per ospedali, case di cura e case di riposo;*
- b) 40 dB(A) Leq notturno per tutti gli altri ricettori;*
- c) 45 dB(A) Leq diurno per le scuole"*

occorre ricordare che tali valori sono implicitamente relativi al caso in cui il rumore è trasmesso per via aerea e, ai fini di una sua efficace mitigazione, si stia optando per eseguire interventi diretti sui ricettori per potenziarne l'isolamento acustico di facciata.

Siamo qui in un caso differente – e per certi versi addirittura opposto giacché un potenziamento dell'isolamento acustico di facciata determinerebbe di fatto un peggioramento delle condizioni e non una miglioria. Infatti, per il rumore di tipo intrusivo trasmesso per via strutturale, un elevato isolamento al rumore immesso in appartamento per via aerea dalla facciata induce un livello sonoro di fondo più basso e, pertanto, una maggiore percepibilità del rumore indotto per via strutturale.

In questo caso specifico la normativa risulta lacunosa nel definire un limite di riferimento relativo al rumore indotto per via strutturale da sorgenti esterne all'edificio.

	TRANVIE DI TORINO – LINEA 4 Modifica capolinea Falchera con anello di ritorno <b>RELAZIONE</b>	Pag. 27 di 38
		REV. 00

Tutto ciò considerato, ai fini del presente studio, ricordando anche i numerosi fattori di incertezza che condizionano il risultato della stima previsionale, si ritiene corretto prevedere come obiettivo acustico per il comfort all'interno delle abitazioni a finestre chiuse (obiettivo, pertanto, non cogente a livello normativo) un livello sonoro indotto per via strutturale inferiore a 25dB(A).

### 5.2.2 Definizione dell'obiettivo di progetto per lo scenario di esercizio relativamente al potenziale disturbo vibrotattile

La stima previsionale per la valutazione del disturbo vibrotattile è condotta a partire dallo spettro di accelerazione di riferimento della sorgente a cui viene applicata l'attenuazione indotta dal sistema terreno+edificio come misurato sul campo oltre alla curva di pesatura  $W_m$  indicata dalla norma UNI9614 per tenere conto della risposta del corpo umano alle sollecitazioni vibratorie.

Anche per il disturbo vibrotattile, come già per la stima relativa al rumore indotto per via strutturale, si fa riferimento alle condizioni di caso peggiore, ovvero di transito del convoglio in corrispondenza del punto del tracciato più vicino al ricettore.

Poiché la valutazione del grado di criticità dipende dalla destinazione d'uso degli edifici e nel caso del presente studio si tratta di un edificio residenziale, la norma UNI9614:2017 indica per il periodo notturno (maggiormente restrittivo) il limite di 3.6mm/s<sup>2</sup> pari a 71dB (Rif. 1E-6m/s<sup>2</sup>).

### 5.2.3 Risultati del calcolo previsionale relativo alle immissioni di rumore per via strutturale

Ricordando che il grado di incertezza della previsione è elevato e non direttamente quantificabile, così come specificato al paragrafo 2.4 del presente documento, le valutazioni previsionali a riguardo delle immissioni di rumore indotto per via strutturale hanno permesso di osservare che:

- 1) La risposta dell'edificio residenziale studiato è tale per cui alcune specifiche bande di frequenza nello spettro dell'udibile non vengono significativamente attenuate lungo la struttura edile e si propagano pertanto verso gli ambienti abitativi. Esse sono comprese nelle bande tra 200 e 500Hz. Esse risultano corrispondere pertanto a frequenze pienamente udibili.
- 2) Lo spettro di emissione di vibrazioni rilevato in concomitanza con il transito delle vetture tranviarie in Piazzale Caio Mario ha evidenziato come alle frequenze comprese tra i 200Hz ed i 500Hz le vibrazioni siano elevate soprattutto nelle bande di 250Hz e 315Hz. L'energia meccanica trasmessa al terreno dalle vetture tranviarie a tali frequenze può pertanto propagarsi fino agli ambienti abitativi se non si introducono specifici elementi disaccoppianti.
- 3) Il livello sonoro stimabile all'interno degli ambienti abitativi in affaccio verso il tracciato può attestarsi su valori dell'ordine di grandezza dei 40dB(A) e risultare pertanto percepibile all'interno delle abitazioni come "rumore trasmesso per via strutturale".

In particolare:

**Tabella 3 Risultati stima livello sonoro indotto per via strutturale in ambiente abitativo**

Velocità transito vettura tranviaria	Stima rumore indotto per via strutturale	Obiettivo di comfort in ambiente abitativo
25 Km/h	> 45dB(A)	< 25dB(A)
20 Km/h	40-45 dB(A)	< 25dB(A)
15 Km/h	40-45 dB(A)	< 25dB(A)

**5.2.4 Risultati della valutazione previsionale relativa al potenziale disturbo di tipo vibrotattile**

Ricordando che il grado di incertezza della previsione è elevato e non direttamente quantificabile, così come specificato al paragrafo 2.4 del presente documento, le valutazioni previsionali a riguardo delle immissioni di vibrazioni hanno permesso di osservare che:

**Tabella 4 Risultati stima livello sonoro indotto per via strutturale in ambiente abitativo**

Velocità transito vettura tranviaria	Stima accelerazione al passaggio	Obiettivo in abitazioni (notte) UNI9614:2017
25 Km/h	> 4 mm/ s <sup>2</sup>	< 3.6 mm/ s <sup>2</sup>
20 Km/h	3 – 4 mm/s <sup>2</sup>	< 3.6 mm/s <sup>2</sup>
15 Km/h	3 – 4 mm/s <sup>2</sup>	< 3.6 mm/s <sup>2</sup>

**5.2.5 Valutazioni relative alla possibile correlazione tra vibrazioni e danni ai manufatti edilizi**

Le stime previsionali eseguite a riguardo della possibile correlazione tra vibrazioni e danni agli edifici<sup>3</sup> hanno permesso di verificare che i valori di velocità di vibrazione stimati in occasione dei transiti dei convogli si attestano ampiamente al di sotto dei limiti indicati dalla norma UNI9916 (rif. Figura 6 del presente documento riportata anche alla pagina seguente per facilità di lettura).

I livelli di vibrazione stimati in concomitanza con i transiti delle vetture tranviarie si attestano in particolare per il sito in oggetto su valori di picco inferiori a 1mm/s e, pertanto, tali da non indicare specifiche potenziali criticità in termini di correlazione tra vibrazioni e possibili fessurazioni negli edifici.

<sup>3</sup> Si ricorda che lo studio NON riguarda l'eventualità di smottamenti del terreno, assestamenti o altri fenomeni assimilabili di tipo macroscopico. L'analisi è condotta unicamente con riferimento alle vibrazioni nei limiti del comportamento elastico dei terreni e dei materiali così come chiaramente specificato dalla norma UNI9916.

**Tabella 5 Richiamo dei valori di riferimento per la velocità di picco della vibrazione rif. norma UNI9916**

Classe	Tipo di edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s				
		Fondazioni			Piano alto	Solai Componente Verticale
		Da 1 Hz a 10 Hz	Da 10 Hz a 50 Hz	Da 50 Hz a 100 Hz <sup>*)</sup>	Per tutte le frequenze	Per tutte le frequenze
1	Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili	20	Varia linearmente da 20 ( $f=10$ Hz) a 40 ( $f=50$ Hz)	Varia linearmente da 40 ( $f=50$ Hz) a 50 ( $f=100$ Hz)	40	20
2	Edifici residenziali e costruzioni simili	5	Varia linearmente da 5 ( $f=10$ Hz) a 15 ( $f=50$ Hz)	Varia linearmente da 15 ( $f=50$ Hz) a 20 ( $f=100$ Hz)	15	20
3	Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)	3	Varia linearmente da 3 ( $f=10$ Hz) a 8 ( $f=50$ Hz)	Varia linearmente da 8 ( $f=50$ Hz) a 10 ( $f=100$ Hz)	8	3/4

<sup>\*)</sup> Per frequenze oltre 100 Hz possono essere usati i valori di riferimento per 100 Hz.

Si ricorda che i valori della tabella sono da interpretare come soglie al di sotto delle quali non è possibile stabilire una correlazione diretta o un sicuro nesso di causa-effetto tra vibrazioni e danni alle strutture.

Dalla tabella si evince come il limite più restrittivo per edifici residenziali e costruzioni simili sia pari a 5mm/s a fronte dei valori stimati che si attestano sull'ordine di grandezza di 1mm/s.

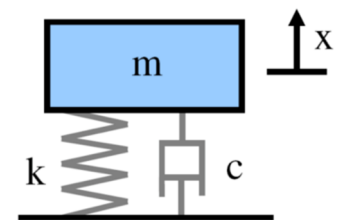
## 6. INDICAZIONI PER IL CONTENIMENTO DELLE IMMISSIONI DI VIBRAZIONI

La valutazione previsionale di impatto da vibrazioni e da rumore intrusivo immesso per via strutturale negli ambienti abitativi è stata svolta con riferimento alle condizioni di realizzazione di una infrastruttura di trasporto su ferro in cui non sono presenti specifici sistemi di contenimento delle emissioni di vibrazioni dall'armamento ferrotranviario verso i ricettori.

Le risultanze dello studio previsionale, ancorché affette da ampi gradi di incertezza hanno evidenziato potenziali elementi di criticità verso le abitazioni più vicine. È pertanto opportuno in questa sede valutare e fornire indicazioni prestazionali per l'adozione di armamenti antivibranti finalizzati alla eliminazione degli elementi di criticità previsti.

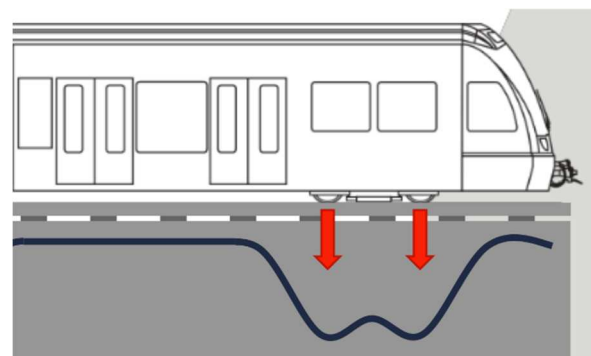
### 6.1 Generalità sui sistemi antivibranti

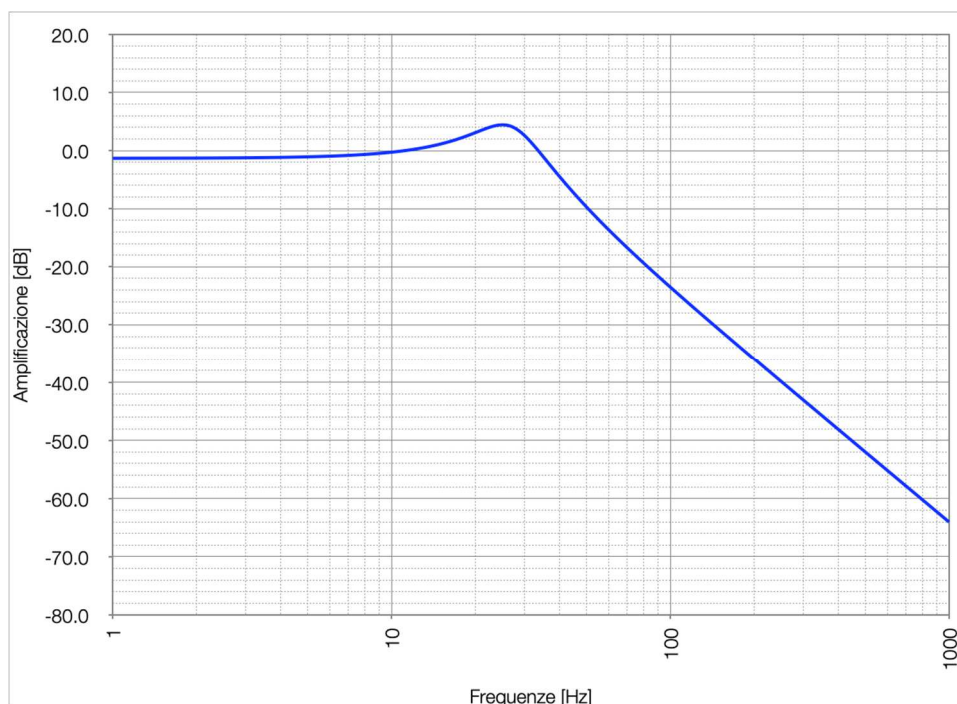
Molteplici sono le soluzioni adottabili per il contenimento della trasmissione di vibrazioni dagli armamenti ferrotranviari verso le strutture edili limitrofe. Esse si basano sul principio del cosiddetto "sistema massa-molla" che viene realizzato interponendo in una o più sezioni dell'armamento un materiale resiliente atto a dissipare energia meccanica ed a limitarne la trasmissione attraverso di esso.



Si presentano qui di seguito alcune tipologie di installazioni di sistemi antivibranti tra quelle normalmente utilizzate nei sistemi ferrotranviari. Nel prosieguo del documento si procederà a fornire indicazioni sulle specifiche prestazionali minime da perseguire in termini di risposta in frequenza del sistema massa-molla per poter prevedere che – a calcolo – l'attenuazione da esso determinata possa essere sufficiente ad annullare gli elementi di criticità previsti. Tutti i sistemi massa molla devono essere dimensionati a partire dalle sollecitazioni meccaniche indotte dal materiale rotabile e dai carichi statici e dinamici in gioco così come sinteticamente schematizzato in figura.

La risposta ideale di un generico sistema massa-molla ad 1 grado di libertà è rappresentata, in funzione della frequenza, nel grafico seguente:





**Figura 25. Spettro ideale di risposta dinamica (modulo) di un sistema massa-molla. Nel caso qui riportato a titolo di esempio a frequenza di taglio è impostata a 20Hz, soglia dell'udibile.**

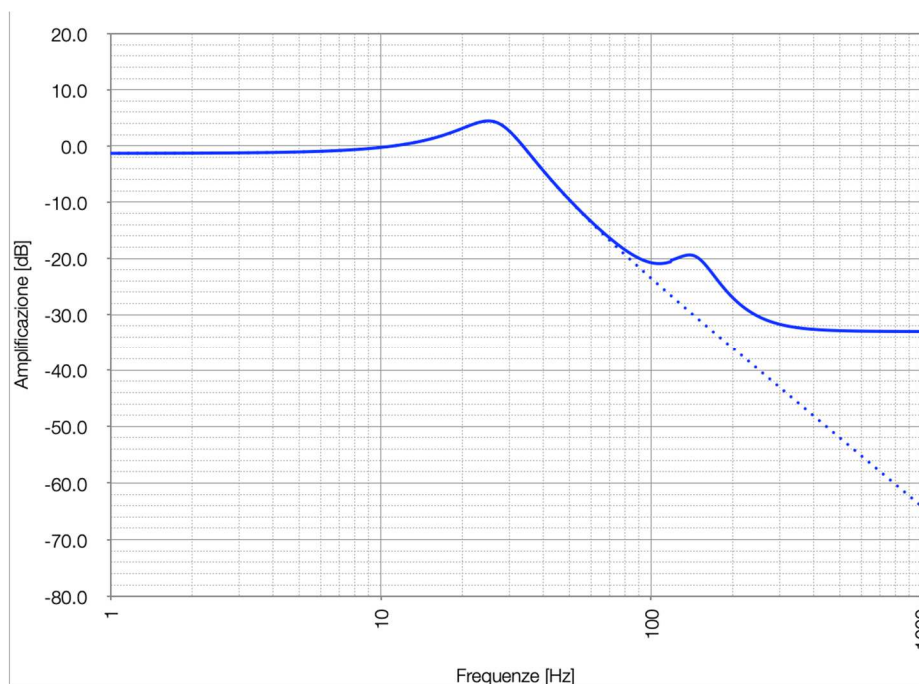
Dal grafico si può osservare come il sistema alle basse frequenze non presenti né attenuazione né amplificazione del segnale.

Ad una frequenza intermedia che dipende dalle caratteristiche del sistema (ovvero dalla massa  $M$ , dalla rigidità  $k$  del supporto elastico e dal fattore  $c$  di smorzamento del supporto elastico medesimo) il sistema presenta una amplificazione del segnale (valori positivi sul grafico). È questa la frequenza di risonanza propria del sistema. In sede di progetto è da evitare che tale frequenza si collochi in corrispondenza di frequenze a cui la sorgente di vibrazioni (materiale rotabile) risulta particolarmente emissiva. In questo caso si rischierebbe di amplificare il segnale ed ottenere effetti indesiderati ai ricettori.

A frequenze superiori rispetto a quella di risonanza propria, infine, il sistema dinamico fornisce una progressiva attenuazione del segnale vibrazionale fornendo pertanto l'effetto desiderato.

Il comportamento reale del sistema determina tuttavia un degrado della prestazione, anche per eventuali risonanze "parassite" o derivanti dalla introduzione di più gradi di libertà, alle frequenze medio-alte riducendo di fatto l'attenuazione teoricamente conseguibile. Un profilo di attenuazione maggiormente realistico rispetto al caso "ideale" è riportato nella figura seguente.





**Figura 26. Spettro di risposta dinamica di un sistema massa molla assimilabile ad un sistema reale a confronto con il sistema "ideale" (curva tratteggiata).**

Si presentano qui di seguito alcune tipologie realizzative per sistemi massa-molla.

#### 6.1.1 *Armamento antivibrante "a platea"*

Si tratta della tipologia di installazione di sistemi "massa-molla" forse più comunemente utilizzata e diffusa. Essa consiste nella realizzazione di un massetto galleggiante sovrapposto ad un materassino resiliente. Al massetto galleggiante sono rigidamente fissate le rotaie. Una soluzione assimilabile può essere realizzata anche come supporto elastico "sotto-traversina".



#### 6.1.2 *Supporto resiliente sulla rotaia*

Si tratta di un sistema massa-molla che concentra il proprio funzionamento nel contenimento delle vibrazioni direttamente attorno alla rotaia. Il supporto elastico costituisce in questo caso anche il fissaggio della rotaia stessa e, pertanto, deve risultare sufficientemente rigido da evitare eccessivi movimenti della medesima.



#### 6.1.3 *Possibile combinazione delle due precedenti soluzioni*

Si tratta di un doppio sistema massa-molla che può consentire il raggiungimento di prestazioni superiori rispetto ai singoli sistemi. Occorre tuttavia verificare che la presenza di più



gradi di libertà non determini eventuali fenomeni di risonanza che – in corrispondenza di specifiche frequenze e sollecitazioni – potrebbero determinare una indesiderata amplificazione del segnale. L'adozione di sistemi a più gradi di libertà viene abitualmente studiata per mezzo di sistemi FEM per escludere eventuali problematiche ad essi legate. Tali valutazioni esulano dal presente studio e vengono eseguite in sede di ottimizzazione dell'armamento antivibrante preselezionato.

#### 6.1.4 Aggancio della rotaia con materiali resilienti

Il sistema si basa sull'aggancio della rotaia con elementi di fissaggio di tipo metallico (in rosso nella foto) aventi proprietà elastiche ed ancorati ad un supporto resiliente sottostante (in nero nella foto) realizzato in gomma vulcanizzata o materiali assimilabili. Tale supporto resiliente viene successivamente ancorato alla platea sottostante per mezzo di tasselli di fissaggio. Questo sistema può essere adottato laddove è previsto un possibile problema di marezzatura della rotaia durante il corso del tempo come, ad esempio, nelle curve a stretto raggio. Il sistema di fissaggio consente infatti di ridurre o rallentare il deterioramento della superficie della rotaia.



Il sistema di fissaggio deve essere oggetto di ottimizzazione in sede di progettazione esecutiva per tenere conto delle caratteristiche del materiale rotabile.

#### 6.1.5 Aggancio laterale della rotaia con materiali resilienti

Il sistema si basa sull'aggancio della rotaia con elementi di fissaggio di tipo metallico rivestiti di materiale resiliente che agisce come elemento di contenimento elastico sia verticale che laterale. Il sistema è orientato a fornire una ridotta rigidità unitamente ad una massa ridotta se comparata con una soluzione prestazionalmente assimilabile quale l'armamento antivibrante a platea, caratterizzato viceversa dalla necessità di una ampia superficie di materiale resiliente e da una massa elevata. Questo sistema può essere adottato laddove è necessaria una elevata prestazione antivibrante anche eventualmente in associazione con una sottostante platea galleggiante.

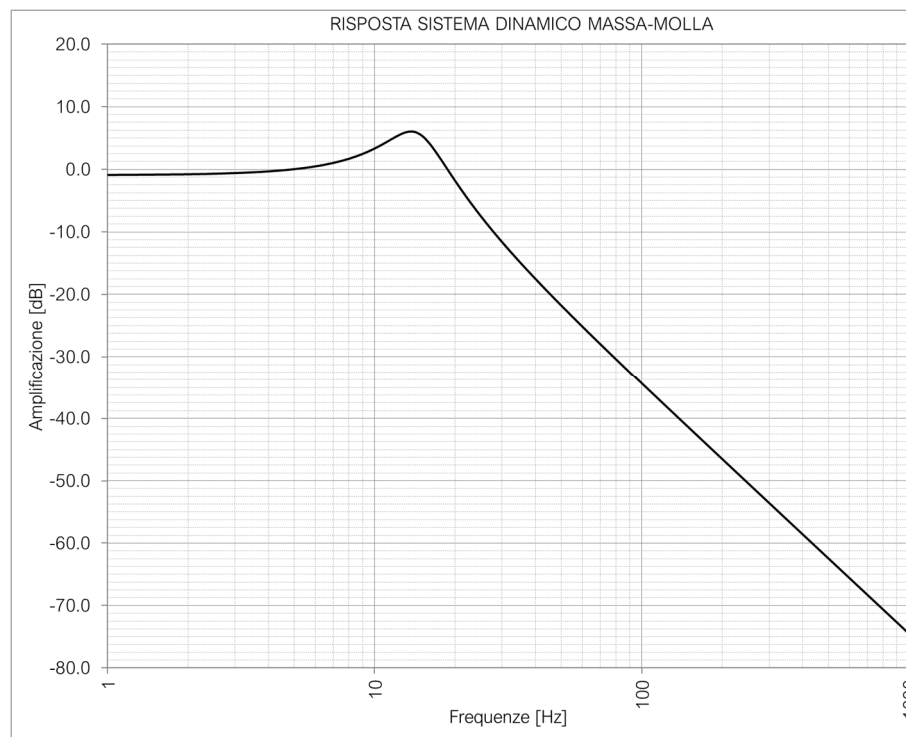


**6.1 Stima delle prestazioni minime utili per poter ricondurre gli elementi di criticità entro gli obiettivi di riferimento**

Sulla base delle caratteristiche di emissione di vibrazioni delle vetture "serie 8000" misurati sul campo (Piazzale Caio Mario) si è osservato che l'energia meccanica da essi trasmessa al terreno e rilevata dalle sonde accelerometriche è principalmente concentrata a frequenze superiori alla banda di 16Hz come osservabile dai grafici del paragrafo 4.1.2 del presente documento.

Si ricorda che l'obiettivo di riferimento è quello di escludere al contempo il possibile manifestarsi di percezioni corporali delle vibrazioni (cosiddetto disturbo vibrotattile) e, in subordine, per il solo comfort interno alle abitazioni a finestre chiuse, è quello di ridurre il livello sonoro indotto per via strutturale dai transiti dei convogli e, possibilmente, portarlo al di sotto del valore di 25dB(A) [obiettivo non cogente sotto il profilo normativo].

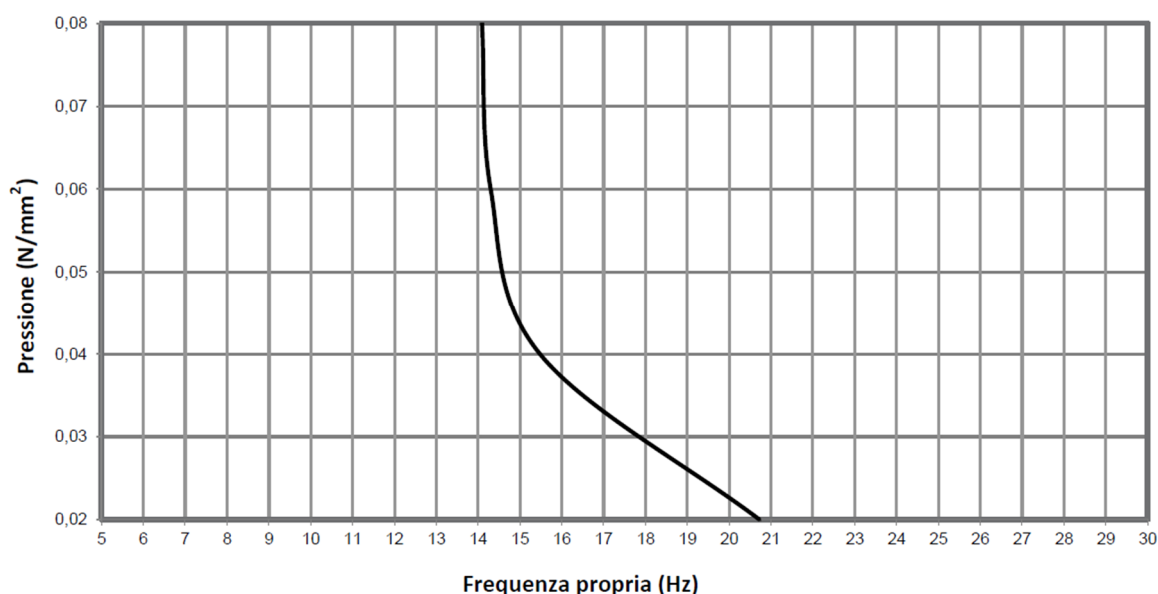
Al fine di perseguire tali obiettivi a partire dai dati misurati sul campo relativamente alle emissioni di vibrazioni dei transiti delle vetture della "serie 8000" e tenendo conto della risposta alle sollecitazioni vibratorie del ricettore di riferimento (edificio di via dei Tigli 14-18) emerge come l'ottimizzazione tra la ricerca delle massime prestazioni di isolamento delle vibrazioni e la fattibilità dell'intervento con supporti antivibranti di tipo commerciale presenti sul mercato porti alla ricerca di un sistema del tipo "massa-molla" avente la frequenza di risonanza primaria attorno ai 14-15Hz, così come rappresentato da grafico del sistema ideale nella seguente figura.



**Figura 27. Spettro di minima risposta utile del sistema massa-molla per l'eliminazione delle criticità vibro-acustiche dello scenario di progetto**

Qualsiasi supporto antivibrante che possa essere interposto tra armamento ferroviario e terreno ed il cui modulo della risposta in frequenza rispetti la curva indicata può essere considerato idoneo al perseguimento degli obiettivi di progetto.

Ad esempio, per questo caso specifico può essere utilizzato un sistema massa molla realizzato con sistema "a platea" per mezzo dell'impiego di un supporto elastico in lastre del tipo Isolgomma Matrack M25 AVC 500" o equivalente. Il supporto indicato presenta una curva di risposta in funzione del carico a cui è sottoposto che evidenzia una frequenza di risonanza compresa tra 14 e 15 Hz in una ampia gamma di carico specifico [N/mm<sup>2</sup>] come da grafico seguente estratto dalla scheda tecnica del prodotto.



**Figura 28. Grafico della distribuzione della frequenza propria del sistema massa molla in funzione del carico a cui è sottoposto il supporto elastico (estratto dalla scheda tecnica di prodotto)**

**6.1.1 Risultati del calcolo previsionale relativo alle immissioni di rumore per via strutturale con gli effetti del supporto elastico antivibrante**

L'introduzione di un sistema antivibrante che possa fornire le prestazioni di isolamento delle vibrazioni come da indicazioni precedentemente formulate consente di prevedere i seguenti livelli sonori indotti in ambiente abitativo:

**Tabella 6 Risultati stima livello sonoro indotto per via strutturale in ambiente abitativo**

5. Velocità transito vettura tranviaria	6. Stima rumore indotto per via strutturale senza supporto antivibrante	7. Stima rumore indotto per via strutturale con supporto antivibrante	8. Obiettivo di comfort in ambiente abitativo
9. 25 Km/h	10. > 45dB(A)	11. < 20 dB(A)	12. < 25dB(A)
13. 20 Km/h	14. 40-45 dB(A)	15. < 20 dB(A)	16. < 25dB(A)

5. Velocità transito vettura tranviaria	6. Stima rumore indotto per via strutturale senza supporto antivibrante	7. Stima rumore indotto per via strutturale con supporto antivibrante	8. Obiettivo di comfort in ambiente abitativo
17. 15 Km/h	18. 40-45 dB(A)	19. < 20 dB(A)	20. < 25dB(A)

*6.1.2 Risultati della valutazione previsionale relativa al potenziale disturbo di tipo vibrotattile con gli effetti del supporto elastico antivibrante*

Parimenti, l'introduzione del medesimo sistema antivibrante che possa fornire le prestazioni di isolamento delle vibrazioni come da indicazioni precedentemente formulate consente di prevedere i seguenti valori di accelerazione indotti in ambiente abitativo:

**Tabella 7 Risultati stima livello sonoro indotto per via strutturale in ambiente abitativo**

21. Velocità transito vettura tranviaria	22. Stima accelerazione al passaggio senza supporto antivibrante	23. Stima accelerazione al passaggio con supporto antivibrante	24. Obiettivo in abitazioni (notte) UNI9614:2017
25. 25 Km/h	26. > 4 mm/s <sup>2</sup>	27. 2.5 – 3.5 mm/s <sup>2</sup>	28. < 3.6 mm/s <sup>2</sup>
29. 20 Km/h	30. 3 – 4 mm/s <sup>2</sup>	31. 2.5 – 3.5 mm/s <sup>2</sup>	32. < 3.6 mm/s <sup>2</sup>
33. 15 Km/h	34. 3 – 4 mm/s <sup>2</sup>	35. 2 – 3 mm/s <sup>2</sup>	36. < 3.6 mm/s <sup>2</sup>

## 7. SINTESI E CONCLUSIONI

Lo studio d'impatto da vibrazioni e da rumore indotto per via strutturale negli edifici per la realizzazione del nuovo capolinea della linea tranviaria 4 in borgata Falchera è stato sviluppato a livello di progetto di fattibilità tecnico-economica con riferimento alle norme tecniche UIN9614 ed UNI9916 per la valutazione del disturbo di tipo vibrotattile e della potenziale correlazione tra vibrazioni e danni agli edifici. In particolare, la norma UNI9916, relativamente ai danni agli edifici correlabili con le vibrazioni, esclude le valutazioni relative a situazioni in cui i danni vengono creati da smottamenti del terreno, cedimenti delle fondazioni, etc...: essa limita pertanto il campo del presente studio alla valutazione delle vibrazioni nel caso in cui i materiali assumano un comportamento elastico.

Lo studio è stato condotto secondo le seguenti fasi operative:

- Analisi del progetto ed individuazione dei ricettori di riferimento (in questo caso un solo edificio residenziale sito in vicinanza del futuro anello)
- Analisi del territorio con riferimento alla natura del terreno (rif. sondaggi e studi geotecnici disponibili presso gli Enti Regionali).
- Esecuzione rilievi di vibrazioni per la caratterizzazione delle emissioni delle nuove vetture "serie 8000" nel percorrere una rotatoria analoga a quella in progetto (Piazzale Caio Mario).
- Esecuzione rilievi di vibrazioni per la caratterizzazione della risposta alle sollecitazioni meccaniche da parte del terreno tra futuro sedime tranviario e ricettore e sul ricettore stesso

	TRANVIE DI TORINO – LINEA 4 Modifica capolinea Falchera con anello di ritorno <b>RELAZIONE</b>	Pag. 37 di 38
		REV. 00

- Esecuzione dei calcoli di stima previsionale della immissione di vibrazioni e di rumore trasmesso per via strutturale negli ambienti abitativi.

-

Per la potenziale correlazione tra vibrazioni e danni agli edifici

Le stime previsionali eseguite a riguardo della possibile correlazione tra vibrazioni e danni agli edifici hanno permesso di verificare che i **valori di velocità di vibrazione si attestano al di sotto dei limiti indicati dalla norma UNI9916**. Non si prevedono pertanto correlazioni tra vibrazioni e danni agli edifici nei limiti di valutazione indicati dalla norma UNI9916 stessa.

Per il rumore indotto per via strutturale all'interno degli ambienti abitativi

In linea generale il transito delle vetture tranviarie sul nuovo anello, nel caso di assenza di specifici interventi di mitigazione della trasmissione delle vibrazioni dal massetto ferroviario verso il terreno, determina la prevista percepibilità del transito medesimo nelle abitazioni situate lungo il tracciato. I valori stimati di livello sonoro si attestano sull'ordine di grandezza di 40dB(A).

La prevista potenziale percepibilità uditiva dei transiti in ambiente abitativo (rumore trasmesso per via strutturale) in occasione del passaggio delle vetture tranviarie ed il fatto che non si possano escludere sporadici superamenti del limite relativo al disturbo vibrotattile più restrittivo (rif. abitazioni in periodo notturno) rende opportuno prevedere **la realizzazione del nuovo anello tranviario con adeguati sistemi di contenimento della trasmissione di vibrazioni dall'armamento tranviario verso il terreno**.

Lo studio ha pertanto analizzato differenti tipologie di sistemi antivibranti per armamenti ferroviari illustrando sinteticamente le loro caratteristiche. Sulla base poi del profilo spettrale delle emissioni di vibrazioni delle vetture "serie 8000" utilizzato come dato di input e della risposta dell'edificio alle sollecitazioni vibratorie è stato individuato lo spettro di minima attenuazione utile per il sistema "massa-molla" che sarà costituito dall'armamento tranviario e dal sottostante supporto elastico. Tale spettro di attenuazione costituisce la specifica prestazionale minima da richiedere all'armamento antivibrante per poter adempiere adeguatamente alla necessaria riduzione delle emissioni di vibrazioni e perseguire quindi l'obiettivo di risoluzione degli elementi di criticità emersi dalle valutazioni previsionali.

## 8. BIBLIOGRAFIA

I riferimenti bibliografici da cui sono stati tratti dati, informazioni ed indicazioni utili per lo sviluppo della valutazione previsionale sono raccolti nel seguente elenco:

- 1) Norma UNI9614, edizioni 1990 e 2017.
- 2) Norma UNI9916:2014
- 3) Kuo ed altri: Hybrid predictions of railway induced ground vibration using a combination of experimental measurements and numerical modelling
- 4) R.Pisani: Origine, propagazione e modelli previsionali delle vibrazioni dei mezzi di trasporto

	TRANVIE DI TORINO – LINEA 4 Modifica capolinea Falchera con anello di ritorno <b>RELAZIONE</b>	Pag. 38 di 38
		REV. 00

**ALLEGATO N.1 CERTIFICATI DI TARATURA DELLA STRUMENTAZIONE DI MISURA DELLE VIBRAZIONI**