

## SS38 "dello Stelvio" - Tangenziale Sud di Sondrio

**Nuovo attraversamento in viadotto della linea ferroviaria Sondrio-Tirano e nuove connessioni alla viabilità locale tra le Pk 40+000 e la Pk 40+700 nei Comuni di Sondrio e Montagna in Valtellina**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**COD. MI634**

PROGETTAZIONE:



PROGETTISTI:

*Ing. Stefano Monni  
Ordine Ing. Prato n. 155*

*Ing. Carlo Mazzetti  
Ordine Ing. Siena n. 1177*

*Dott. Luciano Luciani  
Dott. Sc. Forestali*

*Dott. Giulio Tona  
Ordine Agronomi e Forestali Firenze n. 1045*

*Ing. Michele Frizzarin  
Ordine Ing. Verona n. A4547*

**Il responsabile dell'integrazione tra le varie discipline specialistiche:**

*Ing. Stefano Monni  
Ordine Ing. Prato n. 155*

**Il coordinatore della sicurezza in fase di progettazione:**

*Arch. Giorgio Salimbene  
Ordine Arch. Firenze n. 3997*

**Il geologo:**

*Dott. Geol. Pier Paolo Binazzi  
Ordine Geologi Toscana n. 130*

**VISTO Il responsabile del procedimento:**

*Ing. Giancarlo Luongo*

## STUDIO IMPATTO AMBIENTALE

### ANALISI AMBIENTALE

### VIBRAZIONI

### RELAZIONE IMPATTO VIBRAZIONALE

CODICE PROGETTO

PROGETTO

LIV. PROG.

ANNO

D P M I 0 6 3 4

D

2 3

NOME FILE

T00IA10AMBRE01\_A.DOC

CODICE ELAB.

T 0 0 I A 4 7 A M B R E 0 1

REVISIONE

SCALA:

A

—

A

EMISSIONE PER INTEGRAZIONI VIA

GENNAIO 2024

A. BONALDI

A. DEL BONO

S. MONNI

REV.

DESCRIZIONE

DATA

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO



## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
1.1	Descrizione della procedura d'indagine.....	3
<b>2</b>	<b>NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....</b>	<b>3</b>
2.1	Disturbo da vibrazioni .....	3
2.1.1	<b>UNI 9614: 2017 – SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE .....</b>	<b>4</b>
2.1.2	<b>UNI 9614: 2017 – TERMINI E DEFINIZIONI.....</b>	<b>4</b>
2.1.3	<b>UNI 9614: 2017 – TIPI DI SORGENTI .....</b>	<b>6</b>
2.1.4	<b>UNI 9614: 2017 – MISURAZIONI .....</b>	<b>7</b>
2.1.5	<b>UNI 9614: 2017 – STRUMENTAZIONE .....</b>	<b>8</b>
2.1.6	<b>UNI 9614: 2017 – CALCOLO VALORI EFFICACI .....</b>	<b>8</b>
2.1.7	<b>UNI 9614: 2017 – VALUTAZIONE DEL DISTURBO E LIMITI DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>11</b>
2.2	Danni architettonici .....	12
2.2.1	<b>UNI 9916: 2014 – SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE .....</b>	<b>12</b>
2.2.2	<b>UNI 9916: 2014 – CARATTERISTICHE GENERALI DEL FENOMENO VIBRATORIO .....</b>	<b>13</b>
2.2.3	<b>UNI 9916: 2014 – MISURA DELLE VIBRAZIONI .....</b>	<b>15</b>
2.2.4	<b>UNI 9916: 2014 – TRATTAMENTO DEI DATI .....</b>	<b>15</b>
2.2.5	<b>UNI 9916: 2014 – VALORI DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>RICHIAMI TEORICI SU VIBRAZIONI E PROPAGAZIONE DELLE STESSE.....</b>	<b>18</b>
3.1	Tipologie di onde.....	18
3.2	Comportamento del terreno .....	20
3.3	Modello di propagazione .....	22
3.3.1	<b>Coefficiente di attenuazione geometrica n .....</b>	<b>22</b>
3.3.2	<b>Coefficiente di assorbimento del terreno a .....</b>	<b>23</b>
3.4	Propagazione nelle strutture edilizie .....	24
<b>5</b>	<b>DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO IN PROGETTO.....</b>	<b>26</b>
5.1	Opera di progetto .....	26
5.2	Corso d'opera - Cantierizzazione .....	27
5.3	Caratterizzazione delle sorgenti di vibrazione .....	29
5.3.1	<b>Misurazioni in opera su sorgenti analoghe a quanto in progetto.....</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>PREVISIONE D'IMPATTO VIBRATORIO .....</b>	<b>33</b>
6.1	Analisi vibrazionale in termini di accelerazione.....	34
6.2	Analisi vibrazionale in termini di velocità .....	36

<b>7</b>	<b>INTERVENTI DI MITIGAZIONE .....</b>	<b>37</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>37</b>

## 1 PREMESSA

Scopo del presente elaborato è la **Valutazione Previsionale della componente vibrazionale** a supporto della progettazione del nuovo attraversamento in viadotto della linea ferroviaria Sondrio-Tirano e nuove connessioni alla viabilità locale tra la PK 40+000 e la PK 40+700 nei comuni di Sondrio e Montagna in Valtellina a servizio della SS. 28 dello Stelvio – Tangenziale Sud di Sondrio.

La presente valutazione riguarda sia la **fase di cantiere** che di **esercizio** dell'opera.

### 1.1 Descrizione della procedura d'indagine

La relazione previsionale per le opere in oggetto si articola nei seguenti punti:

- Normativa di riferimento
- Descrizione del progetto
- Risultati della previsione d'impatto vibratorio
- Conclusioni

## 2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

### 2.1 Disturbo da vibrazioni

Non sono presenti riferimenti e limiti cogenti per quanto concerne le immissioni vibratorie.

Di conseguenza le valutazioni previsionali verranno confrontate con i valori limite di accelerazione impressa previsti dalla norma tecnica UNI 9614.

Poiché la versione più recente della norma tecnica UNI 9614 (in vigore dalla data 07/09/2017), nel capitolo dedicato al campo di applicabilità risulta riportato quanto segue:

*«...la presente norma, i valori limite e i metodi in essa indicati non si applicano per i casi in cui la data di pubblicazione della norma è posteriore all'inizio dell'attività della sorgente delle vibrazioni...»*

ed essendo l'oggetto dell'analisi un'opera in progetto la versione più recente della norma tecnica in oggetto (ossia la versione pubblicata nel 2017) trova applicazione al caso in esame.

Nei paragrafi successivi si riportano alcuni richiami ai contenuti della norma tecnica UNI 9614 più recente ed attualmente in vigore al fine di fornire un supporto alla lettura e di rendere maggiormente comprensibili le varie operazioni e considerazioni svolte.

### 2.1.1 UNI 9614: 2017 – SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE

Nel capitolo della norma dedicato a "Scopo e campo di applicazione" viene esplicitato che essa  
*«definisce il metodo di misurazione delle vibrazioni immesse negli edifici ad opera di sorgenti interne o esterne agli edifici e i criteri di valutazione del disturbo delle persone all'interno degli edifici medesimi»*

e che *«si applica a tutti i fenomeni che possono dare origine a vibrazioni negli edifici [...]: traffico su gomma e su rotaia, attività industriali e funzionamento di macchinari, [...]»*

risultando pertanto applicabile al caso in oggetto.

Tra le restrizioni al campo di applicazione viene esplicitato che

*«la presente norma non si applica:*

- *alle vibrazioni derivanti da eventi sismici e affini;*
- *alla valutazione di possibili danni strutturali, architettonici, [...];*
- *alle vibrazioni con frequenza minore del limite di banda inferiore del terzo di ottava con centro a 1 Hz».*

### 2.1.2 UNI 9614: 2017 – TERMINI E DEFINIZIONI

Nel capitolo della norma dedicato a "Termini e definizioni" vengono introdotte le seguenti definizioni, alcune delle quali relative a parametri fisici, matematici e statistici utilizzati nell'analisi di seguito effettuata.

**Accelerazione;  $a(t)$ :** valore istantaneo del modulo del vettore accelerazione in un punto, calcolato come somma vettoriale delle sue tre componenti cartesiane.

**Accelerazione assiale;  $a_x(t)$ ,  $a_y(t)$ ,  $a_z(t)$ :** valore istantaneo di ciascuna delle tre componenti cartesiane del vettore accelerazione in un punto.

**Accelerazione ponderata assiale;  $a_{w,j}(t)$ :** valore istantaneo dell'accelerazione ponderata in frequenza nel dominio del tempo per il j-esimo asse, ottenuta utilizzando la curva  $W_m$  secondo quanto indicato al punto 8.1.2.

**Accelerazione ponderata assiale efficace;  $a_{w,rms,j}(t)$ :** valore efficace valutato all'istante t di  $a_{w,j}(t)$ , calcolato come indicato al punto 8.2, in conformità alla UNI EN ISO 8041-1:2017, punto 3.1.2.3.

**Accelerazione ponderata totale efficace;  $a_w(t)$ :** valore efficace totale valutato all'istante  $t$  sui tre assi calcolato come indicato al punto 8.3.

**Ambiente di misura:** ambiente significativo in termini di permanenza del soggetto esposto o delle attività svolte o ambiente nel quale il soggetto esposto lamenta il maggior disturbo.

**Disturbo:** sensazione personale legata a livelli di vibrazioni che determinano irrequietezza, fastidio, ansia, irritazione.

**Edificio:** costruzione utilizzata come abitazione o per altre attività umane, inclusi uffici, fabbriche, ospedali, scuole, luoghi ricreativi e di culto, spazi commerciali.

**Evento:** elemento minimo del fenomeno vibratorio oggetto di misura, al quale viene associata, come descrittore della vibrazione, la massima accelerazione ponderata. L'individuazione degli eventi viene trattata nell'appendice A sia per fenomeni di natura discontinua, sia per fenomeni di natura continua o stazionaria. Poiché essa contiene elementi essenziali della valutazione, l'appendice A è parte integrante di questa definizione.

**Massima accelerazione ponderata;  $a_{w,max}$ :** il più elevato dei valori efficaci dell'accelerazione ponderata  $a_w(t)$  misurati durante uno specifico evento, calcolato come indicato al punto 8.4.

**Massima accelerazione statistica;  $a_{w,95}$ :** stima del 95° percentile della distribuzione cumulata di probabilità della massima accelerazione ponderata  $a_{w,max}$  misurata sui singoli eventi. Viene calcolata come indicato al punto 8.5.

**Vibrazioni della sorgente,  $V_{sor}$ :** vibrazioni immesse nell'edificio dalla specifica sorgente oggetto di indagine. Sono caratterizzate dal valore dell'accelerazione  $a_{w,95}$ .

**Vibrazioni residue,  $V_{res}$ :** vibrazioni presenti nell'edificio in assenza della specifica sorgente oggetto di indagine. Sono caratterizzate dal valore dell'accelerazione  $a_{w,95}$ .

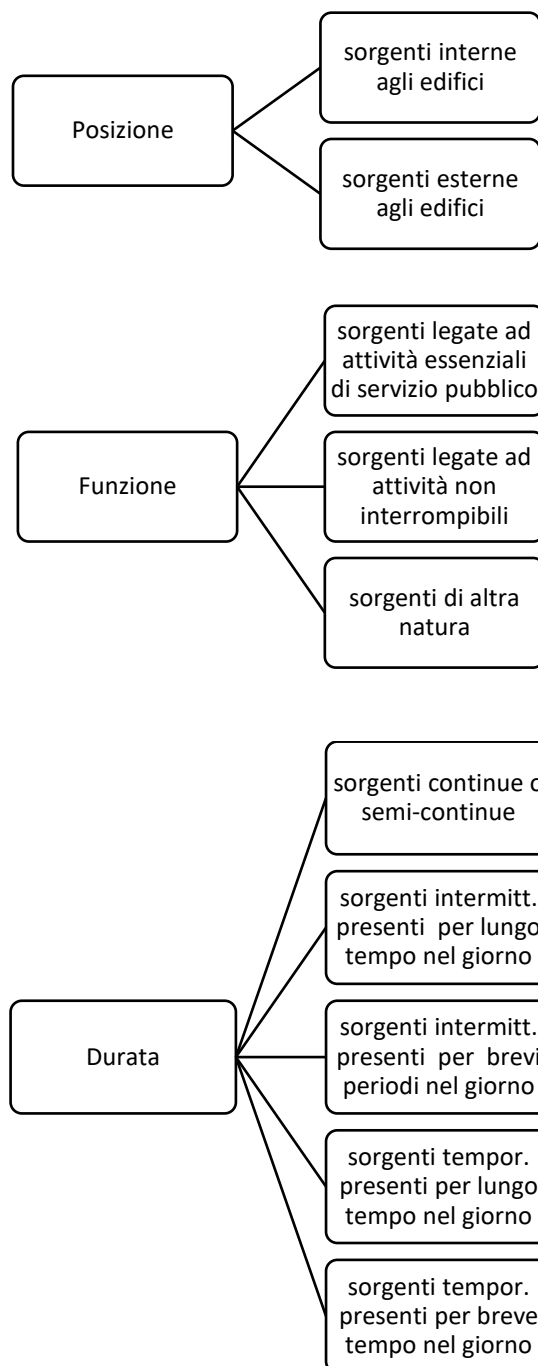
**Vibrazioni immesse;  $V_{imm}$ :** Vibrazioni che vengono immesse nell'edificio da tutte le sorgenti attive di qualsiasi origine ( $V_{sor}$  e  $V_{res}$ ). Sono caratterizzate dal valore dell'accelerazione  $a_{w,95}$ .

Nel caso in esame viene considerato come "evento" ai sensi della definizione poc'anzi riportata, il singolo transito di un treno sull'infrastruttura in oggetto.

I parametri poc'anzi elencati sono stati altresì definiti dal punto di vista matematico all'interno del capitolo 8 della norma.

### 2.1.3 UNI 9614: 2017 – TIPI DI SORGENTI

La norma distingue tra differenti tipologie di sorgenti in rapporto a:



L'opera individuata come sorgente oggetto di analisi è:

- esterna a qualunque edificio che possa essere considerato come recettore abitativo;
- legata ad attività essenziali di servizio pubblico;



- continua, sempre attiva durante la giornata (strada) e temporanea (cantiere).

#### 2.1.4 UNI 9614: 2017 – MISURAZIONI

Nel capitolo della norma dedicato alle "Misurazioni", la norma tecnica UNI 9614:2017 afferma che

*«la grandezza cinematica scelta per la valutazione del disturbo è l'accelerazione assoluta: si deve quindi ricorrere alla misurazione diretta e, quindi, all'impiego di sensori accelerometrici. Non è ammesso l'impiego di velocimetri o altri tipi di sensori e trasduttori».*

Nel presente caso si è pertanto ricorso all'utilizzo di un accelerometro triassiale con il quale si è proceduto alla misura dell'accelerazione indotta dal traffico stradale sull'edificio.

Viene altresì specificato che

*«le postazioni di misurazione devono essere scelte sulla base delle reali condizioni di utilizzo degli ambienti da parte degli abitanti. Sono quindi esclusi dalla valutazione i seguenti ambienti [...]: ripostigli, servizi igienici, cantine, [...], etc.».*

Inoltre

*«poiché il fine della misura è la valutazione del disturbo alla persona, le misurazioni devono essere effettuate in generale sui pavimenti o, in subordine, su elementi strutturali che possano essere:*

- a) In diretto contatto con il corpo umano durante l'attività normale all'interno dell'ambiente;*
- b) Superfici di appoggio per mobili utilizzati per il riposo.*

*Devono essere inoltre evitate misurazioni su superfici che manifestano scarsa aderenza con le strutture [...], superfici morbide o cedevoli o per le quali l'ampiezza delle vibrazioni può derivare anche da cattivo stato di manutenzione».*

Per quanto riguarda la durata complessiva degli eventi la norma specifica che essa è

*«legata al numero di eventi del fenomeno in esame necessario ad assicurare una ragionevole accuratezza statistica, tenendo conto non solo della variabilità della sorgente ma anche dell'ambiente di misura.*

[...]

*Di seguito si riporta il numero minimo di consigliato di eventi da prendere in considerazione nei singoli casi:*

- a) Nel caso di fenomeni caratterizzati da un elevato numero di eventi distinti, devono essere acquisiti i segnali relativi ad almeno 15 eventi scelti con i criteri indicati nell'appendice;*

- b) *Nel caso di fenomeni generati da attività umane dirette con eventi distinguibili, devono essere acquisiti i segnali relativi ad almeno 25 eventi, scelti con le modalità indicate al punto A.6.*

[...].»

Poiché il calcolo del parametro  $V_{SOR}$  prevede la determinazione dei valori relativi alle vibrazioni immesse e residue (cfr. definizioni precedentemente riportate), la norma fornisce alcune specifiche in merito alla misurazione delle medesime:

*«Per il calcolo delle vibrazioni associate alla sorgente ritenuta fonte di disturbo è necessario procedere alla misurazione delle vibrazioni immesse e delle vibrazioni residue.*

*Le vibrazioni residue devono essere misurate nello stesso punto scelto per la misura delle vibrazioni immesse e con le medesime modalità e criteri».*

#### 2.1.5 UNI 9614: 2017 – STRUMENTAZIONE

Nel capitolo dedicato alla "Strumentazione" della UNI 9614:2017 viene specificato che

*«la valutazione del disturbo può essere effettuata con l'impiego di strumentazione dedicata che, oltre all'acquisizione e registrazione del segnale accelerometrico, esegua anche l'elaborazione dei dati».*

Per quanto riguarda il montaggio degli accelerometri occorre

*«garantire la trasmissione rigida del moto dal sistema vibrante all'accelerometro almeno nella banda da 0 Hz a 500 Hz».*

Inoltre

*«le modalità di installazione devono essere indicate nel rapporto di misura; devono essere scelte in relazione alle condizioni dei piani di posa e possono prevedere l'impiego di*

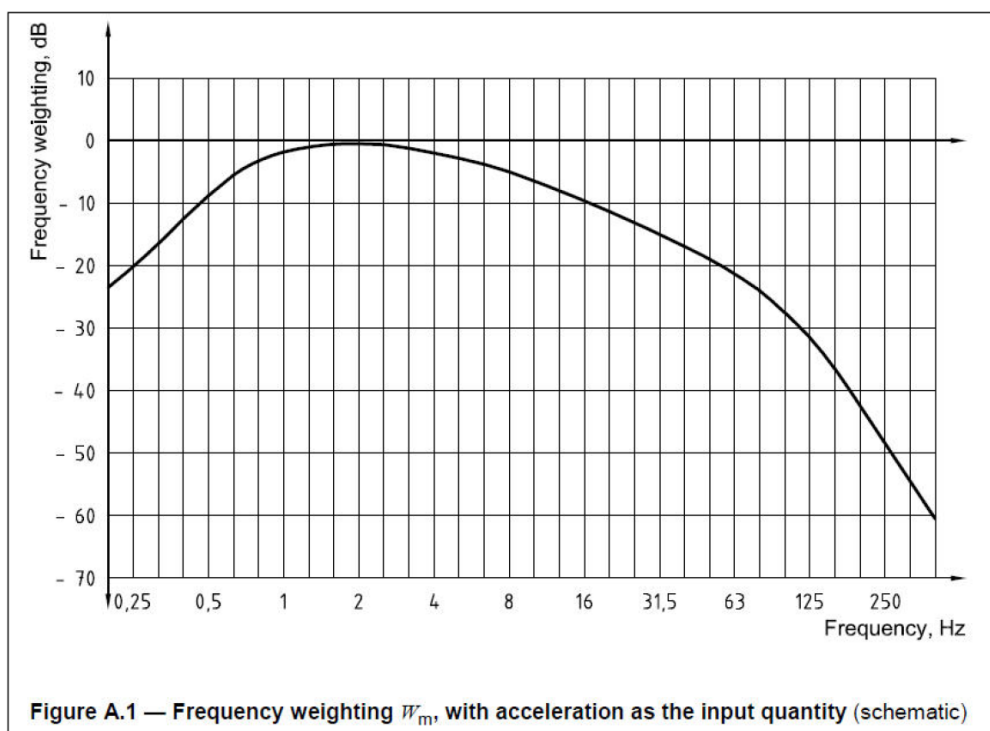
- a) inserti/tasselli (meccanici o chimici) inseriti nel piano di posa;*
- b) collaggi rigidi (con mastici, resine, cera d'api, etc.);*
- c) magneti;*
- d) collegamenti bullonati;*
- e) masse appoggiate alla superficie alla quale viene vincolato l'accelerometro [...].».*

#### 2.1.6 UNI 9614: 2017 – CALCOLO VALORI EFFICACI

Nel capitolo dedicato alla "Strumentazione" della UNI 9614:2017 viene specificato che:

«l'accelerazione misurata sui tre assi  $a_x(t)$ ,  $a_y(t)$ ,  $a_z(t)$  deve essere filtrata con un filtro passa banda (band limiting) con le caratteristiche indicate al punto 8.1.1 e successivamente con il filtro di ponderazione  $W_m$  (rif. norma ISO 2631-2) [...]». La curva di ponderazione  $W_m$  è riportata a seguire.

Wm	f [Hz]																										
	0,8	1	1,3	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315
[mm/s <sup>2</sup> ]	0,70000	0,83300	0,90700	0,93400	0,93200	0,91000	0,87200	0,81800	0,75000	0,66900	0,58200	0,49400	0,41100	0,33700	0,27400	0,22000	0,17600	0,14000	0,10900	0,08340	0,06400	0,04010	0,02410	0,01330	0,00694	0,00354	0,00179
[dB]	-3,09	-1,59	-0,85	-0,59	-0,61	-0,82	-1,19	-1,74	-2,50	-3,49	-4,70	-6,12	-7,71	-9,44	-11,25	-13,14	-15,09	-17,10	-19,23	-21,58	-24,38	-27,93	-32,37	-37,55	-43,18	-49,02	-54,95



Curva di ponderazione  $W_m$

Di seguito si riportano le formule per il calcolo dei parametri definiti all'interno del capitolo 3 della norma UNI 9614:2017:

Per l'intera storia temporale del segnale ponderato viene calcolato l'andamento nel tempo del valore efficace dell'accelerazione ponderata, per ogni singolo asse cartesiano:

$$a_{w,rms,j}(t) = \left( \frac{1}{\tau} \times \int_{t-\tau}^t a_{w,j}^2(\xi) \times d\xi \right)^{0.5}$$

Ove j indica l'asse di misura (x,y e z); il tempo di integrazione è  $\tau = 1s$ .

Il calcolo dovrà essere conforme a quanto indicato nella norma UNI EN ISO 8041-1:2017 al punto D.1.

Si osservi che l'integrazione nel tempo ha natura lineare e non esponenziale.

### Calcolo dell'accelerazione ponderata totale efficace

Il calcolo dell'accelerazione ponderata totale efficace  $a_w(t)$  deve essere eseguito per combinazione, istante per istante, a partire dalle tre accelerazioni assiali ponderate calcolate come nell'equazione (4), mediante l'equazione:

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

Dove  $a_{w,rms,x}^2(t)$ ,  $a_{w,rms,y}^2(t)$ ,  $a_{w,rms,z}^2(t)$  sono le componenti del valore efficace dell'accelerazione ponderata riferita ad ogni singolo asse cartesiano.

La combinazione delle tre componenti assiali del valore efficace dell'accelerazione ponderata è effettuata secondo quanto richiesto dalla norma UNI ISO 2631-1:1997 punto 6.5 con  $k_x = k_y = k_z = 1$ .

### Calcolo della massima accelerazione ponderata

La massima accelerazione ponderata è calcolata come il massimo di tali valori, all'interno del singolo j-esimo evento:

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

### Calcolo della massima accelerazione statistica

La massima accelerazione statistica  $a_{w,95}$  è data dall'equazione:

$$a_{w,95} = \overline{a_{w,max}} + 1.8 \times \sigma$$

Dove:

$\overline{a_{w,max}}$  è il valore medio della massima accelerazione ponderata calcolato mediante la media aritmetica delle massime accelerazioni ponderate  $a_{w,max,j}$  con  $j=1\dots N$ , relative agli N eventi considerati:

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

$\sigma$  è lo scarto tipo della distribuzione delle massime accelerazioni ponderate  $a_{w,max,j}$  calcolato mediante l'equazione :

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

### Calcolo dell'accelerazione associata alla sorgente

Le vibrazioni associate alla sorgente ritenuta fonte di disturbo devono essere quantificate mediante la relazione ponderata massima statistica della sorgente  $V_{sor}$  che deve essere calcolata a partire dalla accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni immesse,  $V_{imm}$  e dalla accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni residue  $V_{res}$  con la seguente equazione:

$$V_{sor} = \sqrt{(V_{imm}^2 - V_{res}^2)}$$

#### 2.1.7 UNI 9614: 2017 – VALUTAZIONE DEL DISTURBO E LIMITI DI RIFERIMENTO

Nel capitolo dedicato alla "Valutazione del disturbo e limiti di riferimento", la UNI 9614:2017 prevede che

«la valutazione del disturbo generato da una sorgente deve essere effettuata confrontando il parametro descrittore della vibrazione  $V_{SOR}$  della sorgente con i limiti di riferimento riportati ai punti 9.1 e 9.2».

Di seguito si riportano i limiti indicati dalla norma per gli ambienti ad uso lavorativo e abitativo.

#### Ambienti ad uso abitativo

“I limiti di riferimento massimi per la massima accelerazione ponderata della sorgente,  $V_{sor}$ , sono:

Periodo	Valore limite
Periodo diurno	<b>7,2</b> mm/s <sup>2</sup>
Periodo notturno	<b>3,6</b> mm/s <sup>2</sup>
Periodo diurno di giornate festive	<b>5,4</b> mm/s <sup>2</sup>

#### Luoghi lavorativi

“Per i luoghi lavorativi, fermi restando gli obblighi inerenti alla tutela della salute del lavoratore, il limite è di **14** mm/s<sup>2</sup>.”

I valori ottenuti saranno confrontati con entrambi i limiti prescritti dalla normativa.

## 2.2 Danni architettonici

Per quanto riguarda la valutazione della possibile insorgenza di danni di tipo “architettonico”, come meglio definiti in seguito, il riferimento normativo risulta essere la norma tecnica UNI 9916 e in particolare la sua versione più recente risulta essere quella pubblicata nel 2014.

Nei paragrafi successivi si riportano alcuni richiami ai contenuti della norma tecnica UNI 9916 più recente ed attualmente in vigore al fine di fornire un supporto alla lettura e di rendere maggiormente comprensibili le varie operazioni e considerazioni svolte.

### 2.2.1 UNI 9916: 2014 – SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE

Nel capitolo della norma dedicato a “Scopo e campo di applicazione” viene esplicitato che:

«essa prende in esame fenomeni vibratorii, siano essi generati dall'attività antropica o naturali, di intensità modesta tale da produrre al più danni architettonici. I valori e le metodologie semplificate riportati non sono infatti generalmente applicabili ai casi di insorgenza di "danno maggiore" [...]»

Con il termine "danno architettonico" si intende:

«effetto residuo delle vibrazioni che determina alterazione estetica o funzionale dell'edificio senza comprometterne la stabilità strutturale o la sicurezza degli occupanti. Il danno architettonico si presenta in molti casi con la formazione o l'accrescimento di fessure filiformi sulle superfici dei muri a secco o sulle superfici intonacate o nei giunti di malta delle costruzioni in mattoni».

Con il termine "danno maggiore" si intende:

«effetto che si presenta con formazione di fessure più marcate, distacco e caduta di gesso e pezzi d'intonaco fino al danneggiamento di elementi strutturali (per esempio fessure nei pilastri e nelle travature, apertura di giunti)».

Viene altresì esplicitato che:

«la presente norma si applica in generale a tutte le tipologie di edifici di carattere abitativo, industriale e monumentale».

Tale classificazione si rifà, come meglio esplicitato all'interno dell'appendice C alla UNI 9916:2014, alla classificazione degli edifici contenuta nella norma tecnica tedesca DIN 4150-3.

### 2.2.2 UNI 9916: 2014 – CARATTERISTICHE GENERALI DEL FENOMENO VIBRATORIO

Nel capitolo della norma dedicato alle "Caratteristiche generali del fenomeno vibrazionale in esame" la UNI 9916:2014 effettua una distinzione tra «fenomeni di lunga durata (o persistenti)» e «fenomeni di breve durata» laddove con il termine "fenomeni di lunga durata (o persistenti)" si intende:

«(fenomeni per cui) l'eccitazione è presente per lunghi periodi [...]»

mentre con «fenomeni di breve durata» si intendono:

«fenomeni caratterizzati dalla presenza di una forzante di durata breve o comunque limitata nel tempo che si presenta spesso come un fenomeno isolato (traffico ferroviario, esplosioni, etc.)».

I fenomeni analizzati nell'ambito della presente analisi, ossia i singoli passaggi veicolari sulle infrastrutture precedentemente descritte, ricadono nella casistica dei «fenomeni di breve durata».

Inoltre, come esplicitato nel paragrafo 4.5 della UNI 9916:2014, poiché «l'effetto delle vibrazioni sui sistemi meccanici e sugli edifici per quanto di interesse della presente norma, varia in funzione dell'ampiezza e della frequenza» l'analisi dei fenomeni «deve essere effettuata anche nel dominio delle frequenze».

A titolo di esempio, nell'appendice A della norma medesima (riportato di seguito) sono riassunti alcuni campi di frequenza caratteristici delle sorgenti di vibrazione più comuni.

Sorgente di vibrazioni	Intervallo di frequenza [Hz]
Traffico (su strada e su rotaia)	Da 1 a 300
Esplosioni	Da 1 a 300
Battitura di pali	Da 1 a 100
Demolizioni (caduta edificio)	Da 1 a 20
Macchine esterne all'edificio	Da 1 a 300
Macchine interne all'edificio	Da 1 a 300
Attività umane (movimento di persone all'interno dell'edificio)	Da 0.1 a 100
Vento	Da 0.1 a 5

Prospetto A1 – Intervalli di frequenza caratteristici (UNI 9916)

Nel presente caso il campo di frequenza di interesse risulta essere 1 ÷ 300 Hz.

Le rilevazioni sono state, pertanto, effettuate nell'ottica di ottenere dati in merito all'entità delle vibrazioni all'interno di tale range di frequenze.



### 2.2.3 UNI 9916: 2014 – MISURA DELLE VIBRAZIONI

Nel capitolo della norma dedicato alla "Misurazione delle vibrazioni" la UNI 9916:2014 afferma che:

*«lo studio finalizzato al riconoscimento del problema, per rispondere alla domanda se i livelli di vibrazioni possano essere potenzialmente pericolosi, ovvero alla verifica del livello di vibrazioni rispetto a riferimenti noti o imposti, può essere limitato alla sola misurazione, in punti prestabiliti, dei valori massimi delle vibrazioni».*

La norma riporta altresì la possibilità di scegliere la grandezza fisica da misurare tra le seguenti tre opzioni:

- Accelerazione;
- Velocità
- Spostamento.

Nel paragrafo relativo ai «requisiti di base dell'acquisizione» viene specificato che:

*«il sistema di misura comprende le seguenti apparecchiature principali:*

- *uno o più trasduttori;*
- *apparecchiatura per il condizionamento dei segnali;*
- *sistema di registrazione dei dati che potrà essere effettuata in forma analogica o digitale.*

*Inoltre per l'acquisizione di tipo digitale sono altresì indicate caratteristiche ed impostazioni minime da rispettare, tra cui*

- *frequenza di acquisizione non inferiore a 250 Hz*
- *catena di misurazione tale per cui il rapporto tra il più piccolo segnale da misurare e il rumore di fondo della catena di misura sia maggiore di almeno 30 dB;*
- *durata dell'acquisizione dipendente dalla natura del fenomeno sotto osservazione.*

Nel presente caso la scelta è ricaduta sull'utilizzo di accelerometri ad alta sensibilità.

### 2.2.4 UNI 9916: 2014 – TRATTAMENTO DEI DATI

Nel capitolo della norma dedicato al "Trattamento dei dati" della UNI 9916:2014 la «velocità di picco di una componente puntuale (peak component particle velocity)» o p.c.p.v. viene individuata come la grandezza di riferimento. Essa è definita come:

«il valore massimo del modulo di una delle tre componenti ortogonali misurate simultaneamente in un punto o ottenute mediante integrazione».

### 2.2.5 UNI 9916: 2014 – VALORI DI RIFERIMENTO

La DIN 4150, alla quale la norma UNI 9916 fa riferimento, prevede che le misurazioni siano effettuate secondo tre assi mutuamente ortogonali: un asse con direzione verticale mentre le due componenti orizzontali sono preferibilmente ortogonali ai muri dell'edificio.

Le posizioni di misura sono riportate direttamente nei rapporti di misura. Parimenti sugli stessi sono indicati gli orientamenti degli assi cartesiani X e Y. L'asse Z risulta ortogonale al terreno.

La norma specifica altresì che i valori di riferimento indicati riguardano solo l'effetto diretto delle vibrazioni. Non sono contemplati effetti indiretti quali per esempio cedimenti provocati dalla compattazione del terreno a seguito delle vibrazioni, conseguentemente non compresi nella presente valutazione.

I valori di riferimento indicati sono quelli al di sotto dei quali, salvo casi particolari, è ragionevole presumere che non vi sia danno, per quanto il superamento dei limiti indicati non implichi necessariamente il verificarsi del danno. Per le vibrazioni di breve durata, come quelle prodotte dal traffico ferroviario nel caso in esame, la norma fornisce il seguente prospetto riassuntivo dei valori di riferimento per le tre classi di edifici individuate.

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 (*)	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

Relazione impatto vibrazionale

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
(*) Per frequenze oltre i 100 Hz possono essere usati i valori di riferimento per 100 Hz.						

rispetto D1 – Valori di riferimento per la velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni di breve durata sulle costruzioni (UNI 9916)

### 3 RICHIAMI TEORICI SU VIBRAZIONI E PROPAGAZIONE DELLE STESSE

Le vibrazioni generate da una sorgente si propagano nel terreno circostante per via solida.

Le modalità di propagazione dipendono dalla composizione del terreno, la quale può influenzare l'ampiezza e la velocità di propagazione.

Durante la propagazione dalla sorgente al ricevitore le onde vibratorie possono essere attenuate o amplificate secondo le modalità illustrate nel seguito.

Inoltre quando le vibrazioni incontrano un edificio possono essere percepite sia sotto forma di vibrazioni (vibrazioni trasmesse al corpo) sia sotto forma di rumore re-irradiato (solitamente di bassa frequenza).

La modellazione del comportamento del terreno sotto l'azione dinamica di una sorgente di vibrazioni rappresenta un problema di estrema complessità, da un lato per la difficoltà insita nella scelta di parametri rappresentativi del terreno, dall'altro per la conoscenza spesso sommaria della funzione di trasferimento sorgente/ricevitore caratteristica dello stesso.

Il livello di vibrazione determinato nello spazio circostante da una sorgente eccitatrice è funzione della tipologia di sorgente e di una serie di attenuazioni dipendenti dalla forma della sorgente e dal tipo di onda considerata, dall'assorbimento del terreno, dall'eventuale presenza di discontinuità nella stessa e dal passaggio delle sollecitazioni dal terreno alle fondazioni.

#### 3.1 Tipologie di onde

Le **onde di volume** (*body waves*, che si propagano in uno spazio) sono costituite da onde longitudinali (onde di tipo P), che si propagano nella direzione parallela alla direzione di propagazione della vibrazione, e da onde trasversali (o di taglio) (*shear waves*, o onde di tipo S), che si propagano in direzione perpendicolare alla direzione di propagazione.

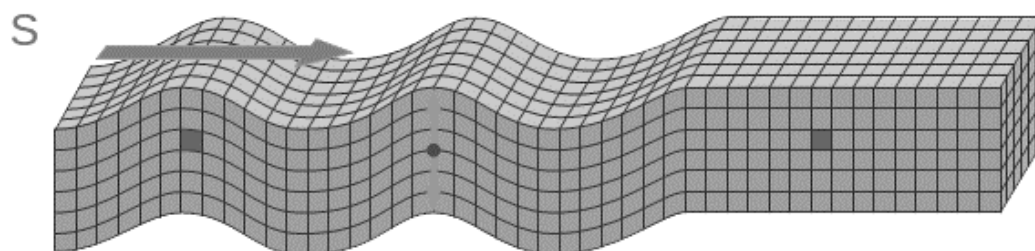
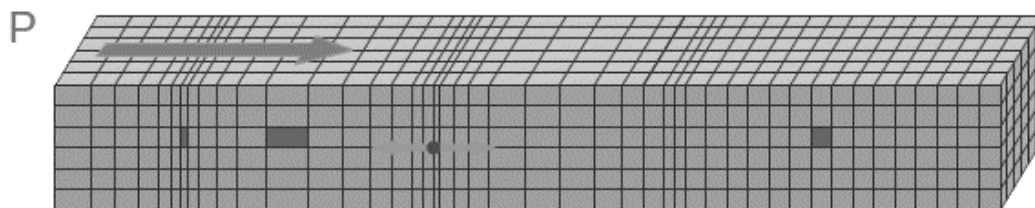
Le **onde di superficie** si dividono in onde orizzontali (onde di tipo R, o *onde di Rayleigh*) e onde verticali (onde di tipo L, o *onde di Love*). Queste onde hanno una propagazione di tipo ellittico che si sviluppa in un piano verticale attraverso la direzione di propagazione della vibrazione.

La propagazione di tutte queste tipologie di onde si può descrivere matematicamente in modo piuttosto agevole in un mezzo elastico omogeneo e continuo, infinitamente esteso. Tuttavia, nella realtà la propagazione delle vibrazioni diventa estremamente complessa in quanto il terreno contiene discontinuità di vario genere e non è mai omogeneo.

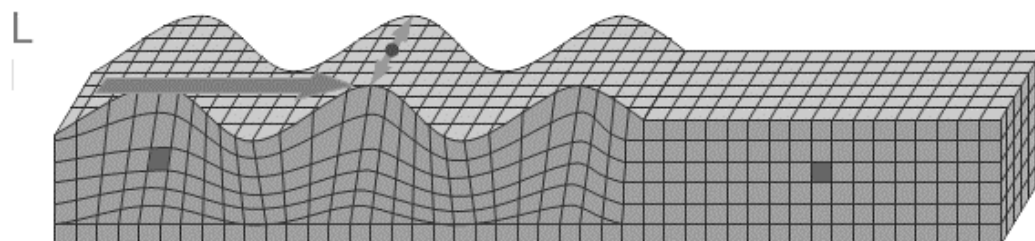
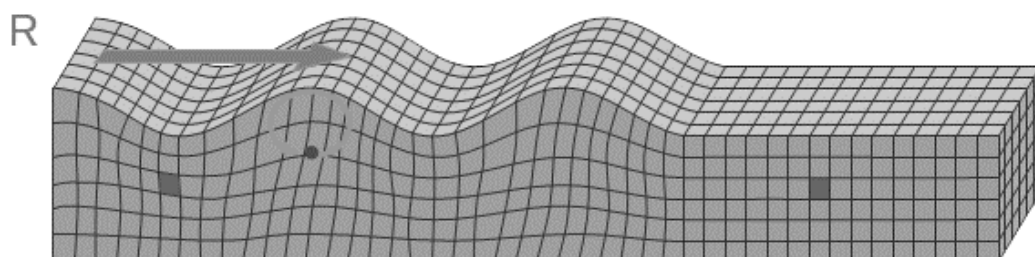
Anche la superficie del terreno e le fondazioni degli edifici costituiscono delle discontinuità che complicano il modello di propagazione ideale, che dunque diventa assai complesso e tale da richiedere un approccio matematico estremamente arduo.

Di seguito si riporta una schematizzazione grafica delle differenti tipologie di onde poc'anzi descritte.

ONDE DI VOLUME



ONDE DI SUPERFICIE



Tipologie di onde

**3.2 Comportamento del terreno**

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. 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.

Per quanto attiene all'analisi del comportamento del terreno rispetto alle azioni dinamiche risulta quindi determinante la suddivisione tra rocce lapidee e rocce sciolte.

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 all'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 reale 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.

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	1,60	600	0,1
Argilla, terreno argillosi	1,70	1500	0,2÷0,5
Molasse	2,25		0,05
Scisti cristallini	2,25		0,05
Depositi alluvionali	1,83		0,05

Calcarì evaporitici	2,25		0,05
---------------------	------	--	------

### 3.3 Modello di propagazione

Il modello di propagazione impiegato, valido per tutti i tipi di onde, si basa sull'equazione di Bornitz:

$$w_2 = w_1 \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^n e^{-a(r_2-r_1)}$$

In cui:

$w_1$  e  $w_2$  sono le ampiezze della vibrazione alle distanze  $r_1$  e  $r_2$  dalla sorgente;

$n$  è il coefficiente di attenuazione geometrica (dipendente dal tipo di onda e di sorgente);

$a$  è il coefficiente di attenuazione del materiale e dipende dal tipo di terreno.

L'equazione tiene conto dei meccanismi di attenuazione geometrica e di dissipazione che l'onda vibrazionale subisce propagandosi nel terreno:

- attenuazione per dissipazione interna del terreno;
- attenuazione geometrica, in relazione al tipo di sorgente e di onda;
- attenuazione dovuta a ostacoli o discontinuità del terreno;
- attenuazione dovuta all'accoppiamento terreno-fondazione;
- attenuazione dovuta alla propagazione in direzione verticale nel corpo
- dell'edificio;
- amplificazione determinata dai solai.

#### 3.3.1 Coefficiente di attenuazione geometrica n

Nella tabella di seguito sono riportati i valori che il coefficiente di attenuazione geometrica "n" assume in funzione del tipo di sorgente e di onda.

Collocazione della sorgente	Tipo di sorgente	Tipo di onda originata	n
Superficie	Puntiforme	Body wave	2,0



	Lineare (infinita)	Surface wave	0,5
		Body wave	1,0
		Surface wave	0,0
In profondità	Puntiforme	Body wave	1,0
	Lineare (infinita)		0,5

### 3.3.2 Coefficiente di assorbimento del terreno *a*

Il coefficiente di attenuazione del materiale "*a*" dipende dal tipo di terreno e cresce linearmente con la frequenza. Ciò fa sì che le alte frequenze si estinguano dopo un breve percorso, mentre le frequenze più basse si propagano a distanze maggiori, come avviene anche in ambito acustico per via dell'attenuazione dell'aria.

Valori del coefficiente "*a*" sono stati riportati da Woods e Jedele per quattro classi di terreno e per due bande di frequenza all'interno del prospetto seguente.

Values of frequency dependent attenuation coefficient, *a*, for four classes of soil materials (from Ref. [19]).

Class	Material damping coefficient <i>a</i> (m <sup>-1</sup> )		Description of material
	5 Hz	50 Hz	
I	0.01–0.03	0.1–0.3	Weak or soft soils ( $N_{SPT} < 5$ )
II	0.003–0.01	0.03–0.1	Competent soils ( $5 < N_{SPT} < 15$ )
III	0.0003–0.003	0.003–0.03	Hard soils ( $15 < N_{SPT} < 50$ )
IV	< 0.0003	< 0.003	Hard, competent rock ( $N_{SPT} > 50$ )

Il coefficiente di attenuazione *a* può essere stimato anche attraverso l'equazione:

$$a = \frac{2\pi f \eta}{c}$$

In cui  $\eta$  è il fattore di perdita del terreno, *c* è la velocità di propagazione in m/s, *f* è la frequenza in Hz.

### 3.4 Propagazione nelle strutture edilizie

La propagazione delle vibrazioni negli edifici 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 di zero dB 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 gli abitanti che per le strutture in quanto pavimenti, pareti e soffitti degli edifici possono essere soggetti a significative amplificazioni delle vibrazioni rispetto a quelle trasmesse dalle fondazioni.

Negli edifici multipiano un valore di attenuazione delle vibrazioni da piano a piano è approssimativamente pari a 3 dB.

Per esempio, i risultati di misure sperimentali svolti da Ishii e Tachibana in un edificio a 10 piani fuori terra con struttura in calcestruzzo armato e acciaio mostrano un'attenuazione pari a circa 3 dB ai primi piani e decrescente fino a 1 dB ai piani più elevati.

La norma DIN 4150 riferisce che, nel caso di vibrazioni orizzontali, le frequenze proprie dei piani di un edificio seguono all'incirca la legge  $f = 10/n$ , laddove  $n$  è 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.

In generale potenziali problematiche possono verificarsi nel caso in cui la frequenza propria dei solai coincida con la frequenza di picco dello spettro di vibrazione del terreno.

In tali casi è anche possibile la comparsa di disturbo da rumore per re-irradiazione delle strutture.

In molti casi la risonanza delle strutture orizzontali può causare un'amplificazione delle vibrazioni nel campo di frequenze comprese tra 10 e 30 Hz.

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

## 5 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO IN PROGETTO

### 5.1 Opera di progetto

L'area oggetto di studio è situata nella provincia di Sondrio lungo il confine tra i comuni di Sondrio e di Montagna in Valtellina.

L'area oggetto di studio (area pianeggiante di fondovalle) interessa superfici aventi destinazione d'uso diverse.

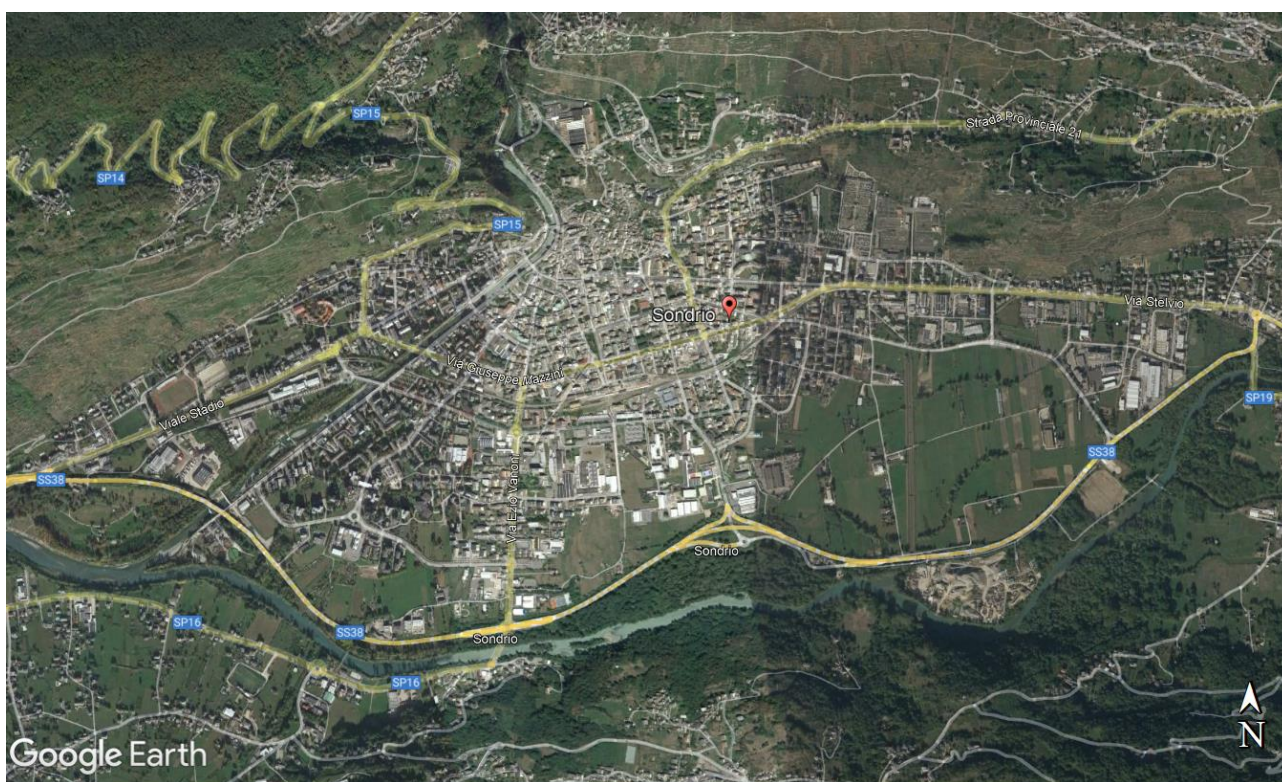


Figura 1 – Area oggetto di studio con identificazione della viabilità esistente

L'intervento SS38 “Tangenziale Sud di Sondrio” in questione è una delle opere già individuate dal decreto 7 dicembre 2020, adottato dal Ministro delle infrastrutture e mobilità sostenibili di concerto con il Ministro dell'economia e delle finanze. Si tratta di opere da realizzare con le risorse stanziare dalla legge di bilancio 2020 (cioè legge 160 del 2019) e finalizzate a garantire la sostenibilità delle Olimpiadi invernali Milano-Cortina 2026.

Nello specifico, la Tangenziale Sud di Sondrio è indicata, nell'ambito del suddetto Decreto, sia nell'allegato C quale opera “essenziale” che nell'allegato D; ciò significa che rientra tra le n. 14 opere ritenute di particolare

complessità per le quali si applica la semplificazione di cui all'articolo 44 del decreto-legge n. 77 del 2021 riguardante lo snellimento delle procedure per le opere del PNRR.

La soluzione progettuale B1 prevede il prolungamento della Tangenziale di Sondrio in continuità con la SS38 eliminando il tratto urbano obbligato all'interno del Comune di Montagna, evitando in questo modo l'interferenza ferroviaria (PL al km 2+521 della linea Sondrio-Tirano) con i flussi di medio-lungo raggio. Non sono presenti intersezioni intermedie su questa nuova direttrice sul lato Est, mentre prevede la realizzazione di uno svincolo a livelli sfalsati nei pressi dell'intersezione con la provinciale SP19 proveniente da Piateda (entrata per i veicoli diretti a Morbegno e uscita in verso opposto da Morbegno verso Piateda, Montagna e Sondrio) e di una rotatoria in corrispondenza dell'intersezione con via Europa che garantisce tutte le manovre di svolta. È inoltre prevista la realizzazione di una rampa di svolta diretta dalla SS38 (proveniente da Tirano) verso via Stelvio, denominata uscita "Trippi" che garantisce la penetrazione verso il capoluogo in modo del tutto analogo a quanto avviene oggi.

Si prevede il mantenimento in esercizio del passaggio a livello situato al km 2+521 della linea ferroviaria Sondrio – Tirano; attualmente il PL essendo itinerario obbligato della SS38 causa fenomeni di congestione e rallentamenti lungo la Statale, mentre nella configurazione di progetto il flusso in corrispondenza del passaggio a livello viene sensibilmente ridotto, poiché i flussi in transito sulla tangenziale trovano prosecuzione verso la SS38 sul viadotto.

In questo scenario via Stelvio mantiene sostanzialmente invariata la sua vocazione di porta di accesso alla città di Sondrio per i veicoli provenienti da Tirano, senza registrare significative variazioni di flusso in direzione Ovest rispetto allo scenario attuale. Il flusso di traffico in uscita dalla città verso Est, data l'assenza di connessione diretta tra via Stelvio e la SS38, si appoggia un nuovo itinerario lungo le vie Germania ed Europa grazie alla possibilità – oggi non permessa – di effettuare tutte le manovre di svolta nel nodo via Europa-Tangenziale. Il sottopasso ferroviario di via Germania, di recente realizzazione (2019), pur essendo caratterizzato da un calibro limitato risulta l'itinerario più veloce, ma può essere supportato anche dall'altro sottopasso situato in via Fiume (con proseguimento verso Ovest tramite via Brigata Orobica).

## 5.2 Corso d'opera - Cantierizzazione

Il processo di cantierizzazione è stato studiato in relazione sia all'analisi puntuale delle caratteristiche localizzative, costruttive e dei fabbisogni generati da ogni singolo intervento, sia alla necessità di rispettare le tempistiche realizzative previste per l'esecuzione degli interventi in progetto.



Il cantiere è stato organizzato per fasi costruttive progressive tali da consentire sempre l'esercizio del traffico stradale per tutte le direttrici interessate.

Per il solo tratto di raccordo tra il nuovo tracciato della SS 38 su viadotto e via Stelvio, in relazione alla realizzazione della spalla e dei muri di contenimento, sarà necessario disporre un senso unico alternato regolato da impianto semaforico per tutta la durata della lavorazione.

Di seguito vengono indicate le fasi realizzative delle opere in progetto.

#### **Fase 0**

In questa prima fase verranno realizzate tutte le opere di accantieramento, allestimento campo base e bonifica ordigni bellici;

#### **Fase 1 e Fase 2 - Rotatoria Via Europa**

Durante la prima fase per la realizzazione della rotatoria sull'incrocio tra Via Europa e la S.S. 38, verranno realizzate tutte le opere esterne alla sede stradale della S.S. 38, mantenendo il traffico attivo sulla stessa e su Via Europa. Il cantiere operativo presenterà due accessi, rispettivamente al livello superiore (stradale) ed a livello inferiore (a quota della viabilità di servizio) per consentire un agevole accesso dei mezzi all'area oggetto degli interventi di realizzazione dei rilevati. Una volta completata la realizzazione delle opere esterne si procederà con la realizzazione della rotatoria lungo la sede stradale. Il traffico veicolare sfrutterà la porzione di rotatoria già realizzata: saranno garantite le medesime percorrenze e direzionalità consentite allo stato attuale ma dovrà essere istituito un senso unico alternato regolato da semafori. L'ultima fase, prima della messa in esercizio, prevede la realizzazione dell'innesto lungo la S.S. n. 38 dello Stelvio lato ovest e la realizzazione tappeto di usura.

#### **Fase 3 – Variante SS38**

Nella prima fase di esecuzione della variante della S.S. 38 si realizzeranno tutte le opere esterne alla viabilità esistente che si manterrà in esercizio. Si costruiranno pertanto la Rampa nord e la Rampa sud ed i relativi rilevati. Saranno messe in opera le fondazioni e le elevazioni delle spalle e delle pile non interferenti con la viabilità esistente, quindi la Spalla B e le Pile 1-2-3. Infine, si realizzeranno tutte le opere esterne alla sede stradale esistente per la costruzione della rotatoria sulla SP 19. Per la messa in opera di tali opere sarà necessario parzializzare la carreggiata dalla SS 38 mantenendo comunque il doppio senso di marcia.

#### **Fase 4 – Variante SS38**

È prevista la realizzazione di una viabilità di bypass verso il centro abitato di Montagna in Valtellina prima della salita sul nuovo viadotto della S.S. n. 38 dello Stelvio per chi proviene da Tirano. A tal fine sarà realizzato

un manufatto scatolare per l'allargamento della piattaforma stradale lungo il torrente Davaglione nonché la rettifica degli accessi e dei confini di alcune proprietà che si attestano su via dello Stelvio. A completamento di queste fasi, con l'esercizio della nuova viabilità su via Stelvio, per permettere la realizzazione della spalla B e dei muri di contenimento, verrà mantenuto un senso unico alternato regolato da impianto semaforico. In conseguenza di questa modifica, anche alcune strade limitrofe attestanti su via Stelvio dovranno essere temporaneamente gestite con percorrenza a senso unico.

#### **Fase 5 – Variante SS38**

Durante la seconda fase di esecuzione della variante della SS 38, il traffico verrà deviato sulla rampa nord e sulla rampa sud che tramite la nuova rotatoria sulla SP 19 consentirà tutte le manovre in ingresso ed uscita al comune di Montagna in Valtellina. In questa fase si realizzerà il corpo stradale dell'asse principale ed i relativi muri di contenimento nonché la Spalla A.

Contemporaneamente a tutte queste lavorazioni potrà essere realizzata la carpenteria metallica dell'impalcato in modo tale che una volta ultimate le ultime elevazioni si potrà procedere con il varo dello stesso. A seguito delle opere di completamento, quali barriere di sicurezza e segnaletica, la nuova variante alla S.S. 38 può essere aperta al traffico.

#### **Fase 6 – Opere di completamento**

Durante l'ultima fase dei lavori saranno completate le opere per la realizzazione della nuova pista ciclabile di collegamento a quella lungo fiume Adda. Contemporaneamente si realizzeranno le opere a verde di mitigazione e lo smantellamento del cantiere.

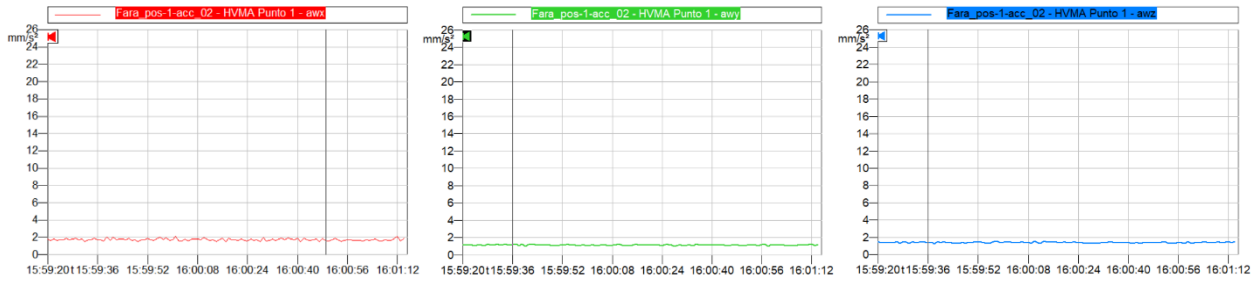
### **5.3 Caratterizzazione delle sorgenti di vibrazione**

#### **5.3.1 Misurazioni in opera su sorgenti analoghe a quanto in progetto**

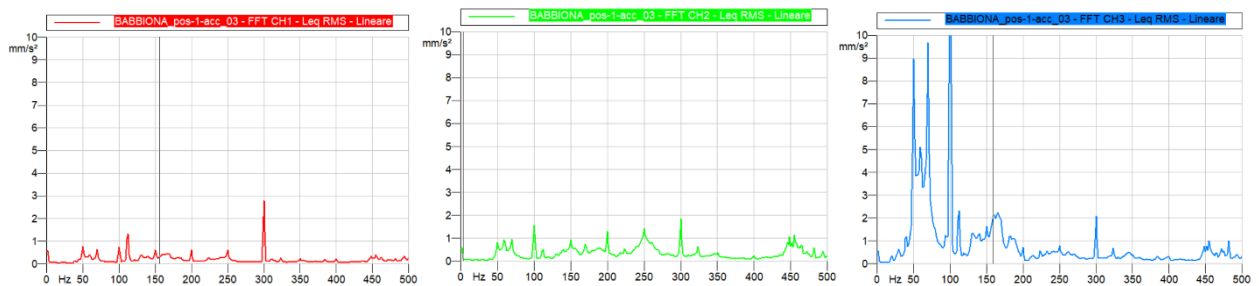
Al fine di ottenere un risultato quanto più possibile realistico si è proceduto allo svolgimento di misurazioni vibrometriche presso aree di cantiere e viabilità analoghe a quanto in progetto di cui si riportano in stralcio i risultati ottenuti:

Relazione impatto vibrazionale

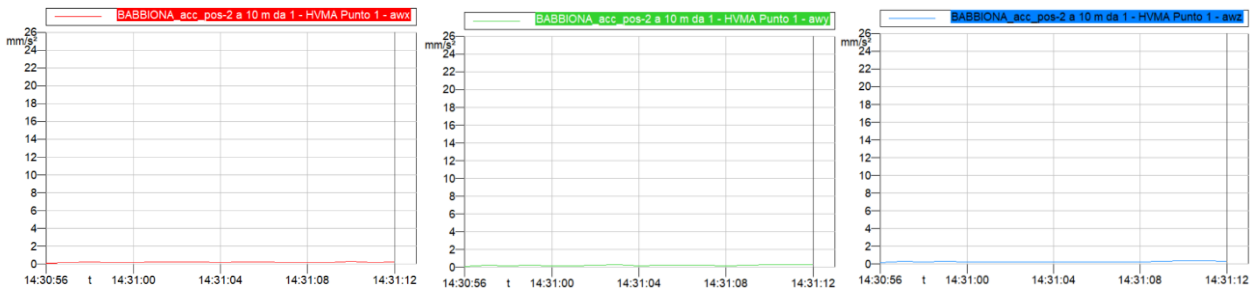
Pos. 1 - Time History



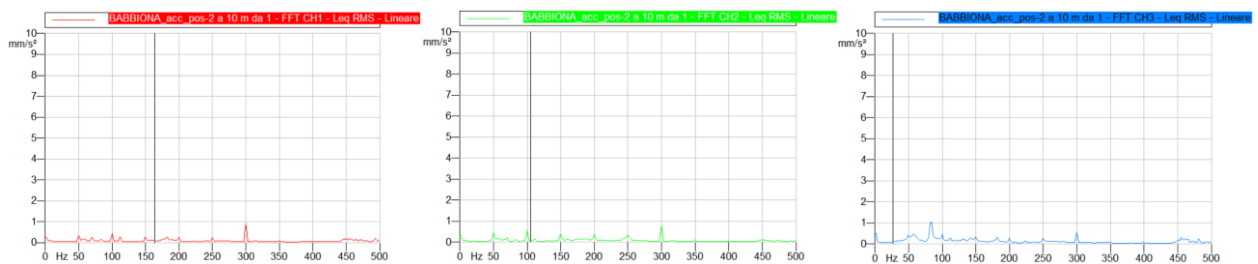
Pos. 1 - Spettro di frequenza



Pos. 2 - Time History

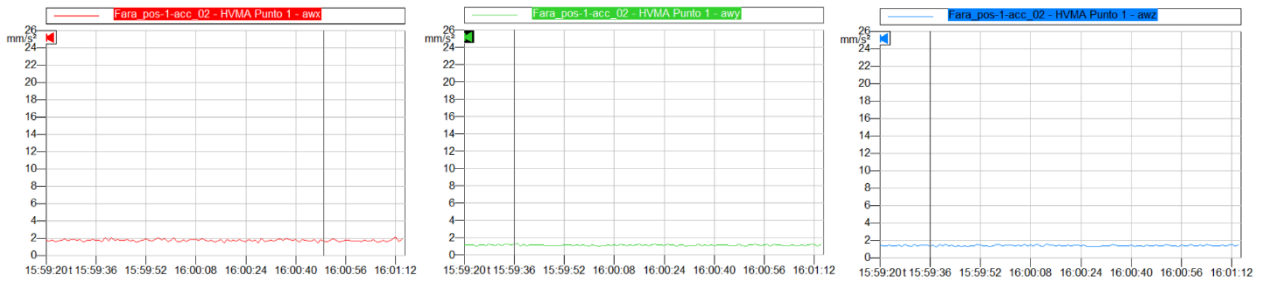


Pos. 2 - Spettro di frequenza

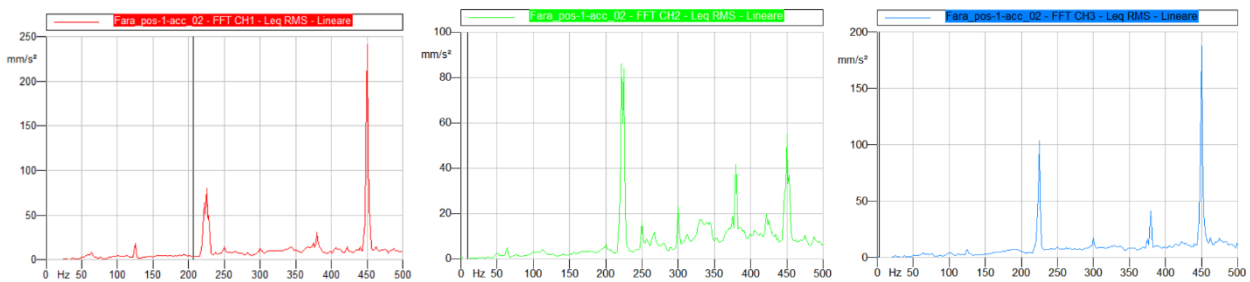




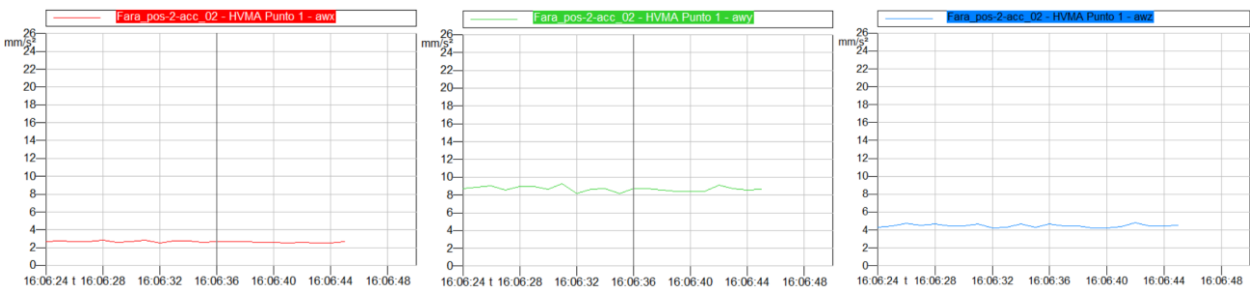
Pos. 3 - Time History



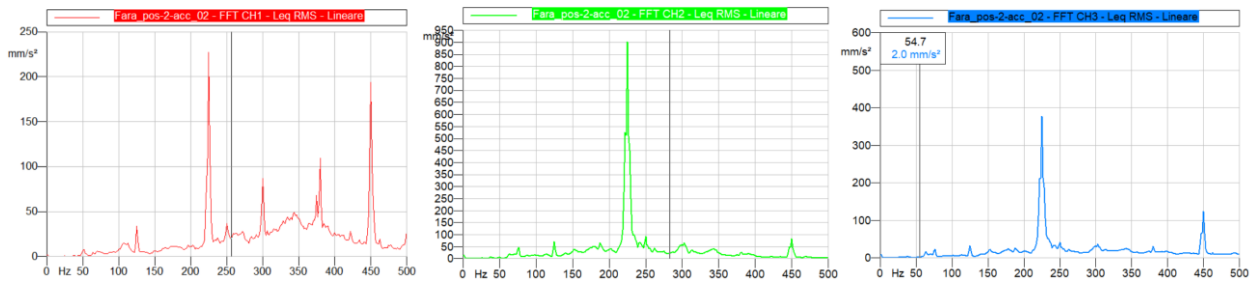
Pos. 3 – Spettro di frequenza



Pos. 4 - Time History

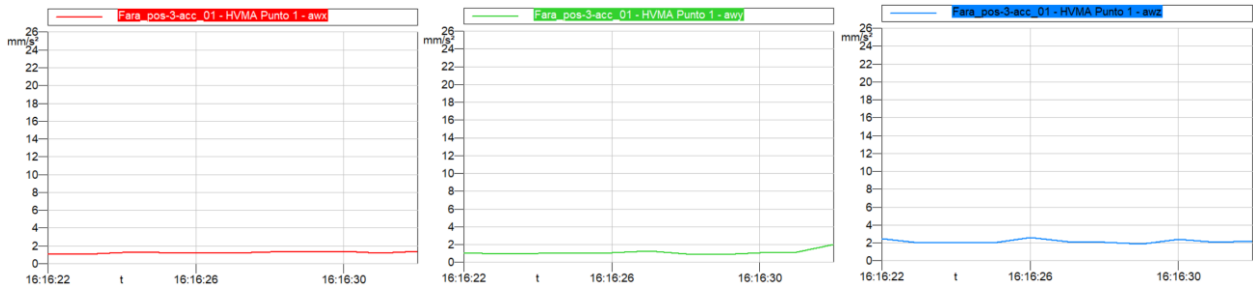


Pos. 4 – Spettro di frequenza

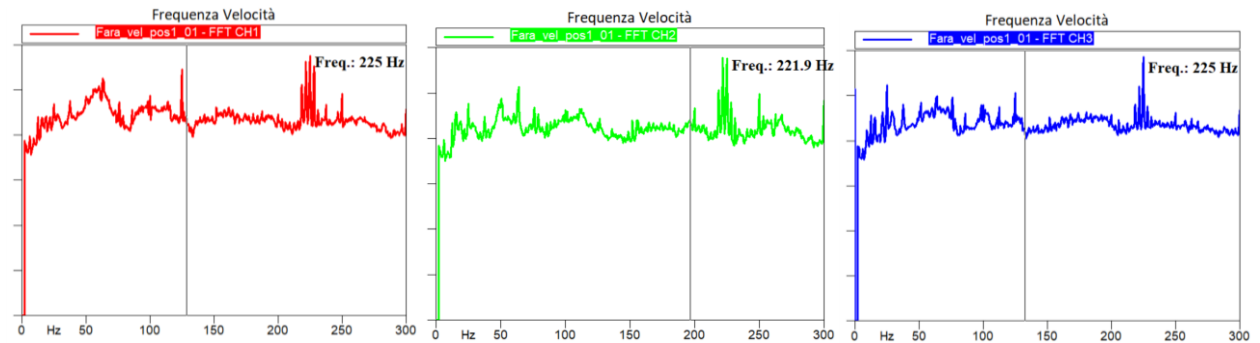
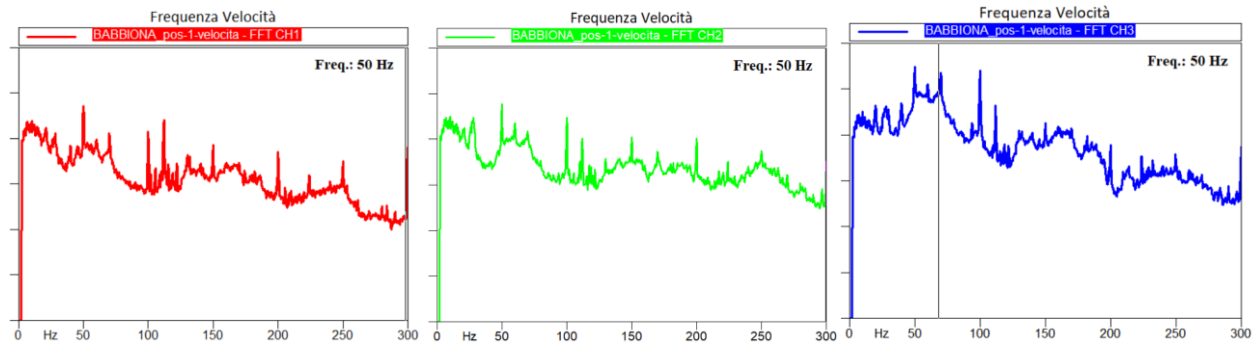
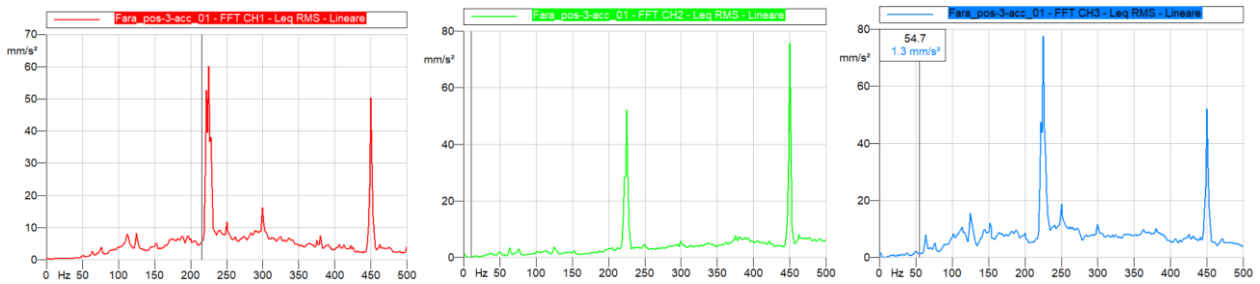


Relazione impatto vibrazionale

Pos. 5 - Time History



Pos. 5 – Spettro di frequenza



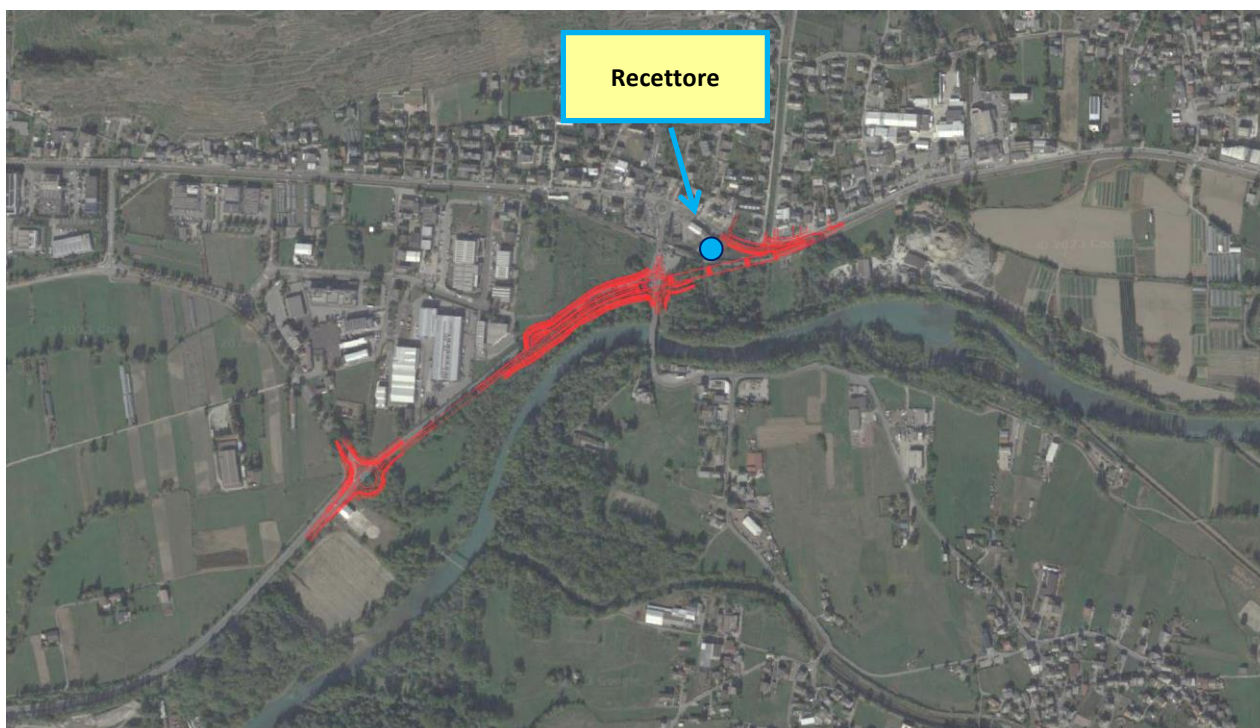
## 6 PREVISIONE D'IMPATTO VIBRATORIO

Il problema dell'impatto da vibrazioni viene normalmente sviluppato attraverso un'analisi composta da tre fasi:

- Caratterizzazione della sorgente di vibrazioni;
- Caratterizzazione del percorso e delle modalità di propagazione;
- Caratterizzazione dei potenziali ricettori.

Per quanto attiene alla caratterizzazione delle sorgenti di vibrazioni si rimanda a quanto riportato nel capitolo precedente.

Per quanto attiene all'individuazione e caratterizzazione dei potenziali recettori si rimanda a quanto previsto nel Piano di monitoraggio ambientale. In particolare, viene ritenuto maggiormente esposto il recettore riportato di seguito, sia per la fase di cantierizzazione che di esercizio dell'opera:



## 6.1 Analisi vibrazionale in termini di accelerazione

Per quanto attiene ai livelli di accelerazione, partendo dai livelli rilevati presso i luoghi si è proceduto a svolgere alcuni calcoli di propagazione mediante le formule precedentemente riportate e descritte.

In particolare il dato di partenza utilizzato nei calcoli è il livello di accelerazione (somma vettoriale dei contributi nelle tre direzioni dello spazio) rilevato presso i punti di misura su sorgenti analoghe a quelle di progetto.

I calcoli sono stati svolti considerando le seguenti ipotesi prudenziali:

- coefficiente di attenuazione geometrica  $n$  pari a 0,5 (per sorgente puntiforme collocata nei pressi della superficie, considerando in via prudenziale il più gravoso tra i due coefficienti indicati rispettivamente per body wave e surface wave);
- coefficiente di assorbimento del terreno pari a 0,00029 (ordine di grandezza del coefficiente più gravoso precedentemente riportato, valido per terreni duri e rigidi come per es. la roccia);
- coefficiente di accoppiamento pari a 1 (nessuna perdita di contenuto energetico della vibrazione nel passaggio dal terreno alla fondazione);
- perdita d'interpiano pari a 0 dB (nessuna perdita di contenuto energetico della vibrazione nel passaggio da piano terra ai piani superiori);
- fattore di amplificazione per risonanza pari a 8 (massimo valore indicato dalla norma tecnica DIN 4150 per condizioni non eccezionali, che nello specifico del presente caso non vi è necessità di valutare non risultando sussistenti date le caratteristiche geometriche, costruttive e materiche dei recettori abitativi individuati).

Di seguito si riporta un prospetto riassuntivo del calcolo di propagazione effettuato.

Calcolo propagazione vibrazionali a partire da vibrazioni rilevate a distanza nota dalla sorgente		
$w_1$ (vibrazione rilevata a distanza $r_1$ dalla sorgente)	0.42	$\text{mm/s}^2$
$w_1$ (vibrazione rilevata a distanza $r_1$ dalla sorgente)	0.00042	$\text{m/s}^2$
$r_1$	10	m
$r_2$	40	m
n (coefficiente di attenuazione geometrica n)	0.5	
a (coefficiente di assorbimento del terreno)	0.00029	
$w_2$	0.00021	$\text{m/s}^2$
$w_2$	0.20818	$\text{mm/s}^2$
Coefficiente di accoppiamento	1	
$w_3$	0.00021	$\text{m/s}^2$
$w_0$	1.00E-06	$\text{m/s}^2$
$w_3$ (in dB)	46.4	
Perdita interp.	0	
$w_4$ (in dB)	46.4	
$w_4$	0.20818	$\text{mm/s}^2$
Fattore amplificazione per risonanza	8.00000	
<b><math>w_4</math> ampl.</b>	<b>1.66545</b>	<b><math>\text{mm/s}^2</math></b>

Calcolo propagazione vibrazionali a partire da vibrazioni rilevate a distanza nota dalla sorgente		
$w_1$ (vibrazione rilevata a distanza $r_1$ dalla sorgente)	0.98	$\text{mm/s}^2$
$w_1$ (vibrazione rilevata a distanza $r_1$ dalla sorgente)	0.00098	$\text{m/s}^2$
$r_1$	2.5	m
$r_2$	40	m
n (coefficiente di attenuazione geometrica n)	0.5	
a (coefficiente di assorbimento del terreno)	0.00029	
$w_2$	0.00024	$\text{m/s}^2$
$w_2$	0.24235	$\text{mm/s}^2$
Coefficiente di accoppiamento	1	
$w_3$	0.00024	$\text{m/s}^2$
$w_0$	1.00E-06	$\text{m/s}^2$
$w_3$ (in dB)	47.7	
Perdita interp.	0	
$w_4$ (in dB)	47.7	
$w_4$	0.24235	$\text{mm/s}^2$
Fattore amplificazione per risonanza	8.00000	
<b><math>w_4</math> ampl.</b>	<b>1.93880</b>	<b><math>\text{mm/s}^2</math></b>

Il livello di accelerazione di partenza risultava essere già di suo inferiore al valore limite di riferimento indicato dalla norma tecnica UNI 9614:2017 per la massima accelerazione ponderata della sorgente  $V_{\text{sor}}$  riferita ad ambienti ad uso abitativo e al periodo di riferimento notturno (ossia  $3,6 \text{ mm/s}^2$ ).

Inoltre, anche considerando ipotesi di propagazione e di amplificazione per effetto di risonanza molto prudenziali (come poc'anzi descritto), il livello risultante risulta essere inferiore al valore limite di riferimento indicato dalla norma tecnica UNI 9614 per ambienti abitativi in periodo notturno.

## 6.2 Analisi vibrazionale in termini di velocità

Per quanto attiene ai livelli di vibrazione espressi in termini di velocità, la rilevazione in situ ha fornito nei pressi della sorgente valori notevolmente inferiori (di circa due ordini di grandezza) al valore limite di velocità più basso indicato nella norma tecnica UNI 9916:2014 (ossia  $5 \text{ mm/s}$ ) al di sotto del quale non vi è insorgenza di danni di tipo architettonico.



Il livello di velocità rilevato alla sorgente presenta un'entità talmente al di sotto del valore limite da non rendere necessari ulteriori approfondimenti in quanto anche trascurando le attenuazioni dovute al percorso delle onde di vibrazione tra sorgente e ricevitore e considerando la sussistenza di eventuali fenomeni di amplificazione per risonanza, il livello di velocità rilevabile al ricevitore è certamente al di sotto del valore limite indicato nella norma tecnica UNI 9916:2014.

## 7 INTERVENTI DI MITIGAZIONE

Stante i valori dei livelli vibratorii della sorgente di per sé contenuti e già nei limiti normativi alla sorgente, non prevedendo in base alla morfologia dei luoghi ed alle frequenze principali riscontrate alla sorgente effetti di amplificazione significativi, non risultano necessari interventi "specifici".

## 8 CONCLUSIONI

Sulla base dell'analisi svolta, si ritiene che il cantiere e l'opera di progetto determinino un'immissione di vibrazioni in corrispondenza dei recettori, sia in termini di accelerazione sia in termini di velocità, al di sotto dei valori limite indicati per i due parametri fisici dalle due norme tecniche precedentemente richiamate.

In conclusione, fatta eccezione per la realizzazione "a regola d'arte" del progetto in oggetto -comprendente la corretta posa e installazione dei vari componenti, secondo gli accorgimenti di buona pratica, in particolar modo evitando connessioni tra strutture/manufatti esistenti e l'opera da realizzarsi, non si prevedono disturbi legati alla componente vibrazionale.