

COMMITTENTE:



Aps Holding s.p.a.  
Società soggetta all'attività di direzione e coordinamento del Comune di Padova

IL DIRETTORE FUNZIONALE  
Dott. Ing. Diego Galiazzo

IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO  
Arch. Gaetano Panetta

PROGETTAZIONE:

MANDATARIA



MANDANTE



MANDANTE



MANDANTE



**Italferr S.p.A.**

**PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA  
NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3**

**STUDIO VIBRAZIONALE**

Relazione generale

IL PROGETTISTA RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE  
Dott. Ing. Luca Bernardini

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.



NP00 00 D 22 RG IM0004 002 A

| Rev. | Descrizione         | Redatto      | Data       | Verificato          | Data       | Approvato | Data       | Autorizzato Data         |
|------|---------------------|--------------|------------|---------------------|------------|-----------|------------|--------------------------|
| A    | EMISSIONE ESECUTIVA | C.Giannobile | Marzo 2020 | E.Zola<br>A.Corvaja | Marzo 2020 | A.Peresso | Marzo 2020 | D.Ludovici<br>Marzo 2020 |
|      |                     |              |            |                     |            |           |            |                          |
|      |                     |              |            |                     |            |           |            |                          |
|      |                     |              |            |                     |            |           |            |                          |





File: NP0000D22RGIM0004002A

n. Elab.:

| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  | <p style="text-align: center;"><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>  |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |         |
|---|--|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|---------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">COMMESSA</th> <th style="text-align: left;">LOTTO</th> <th style="text-align: left;">CODIFICA</th> <th style="text-align: left;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: left;">REV.</th> <th style="text-align: left;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NP00</td> <td>00 D 22</td> <td>RG</td> <td>IM004002</td> <td>A</td> <td>1 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 1 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO  | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |         |
| NP00  | 00 D 22  | RG       | IM004002  | A        | 1 di 31   |      |        |      |         |    |          |   |         |

## INDICE

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>1.</b> | <b>PREMESSA .....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>2.</b> | <b>DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI TRASPORTO SU GOMMA A GUIDA<br/>VINCOLATA .....</b> | <b>3</b>  |
| <b>3.</b> | <b>RIFERIMENTI NORMATIVI.....</b>  | <b>6</b>  |
| 3.1       | IL QUADRO DELLE NORME DI RIFERIMENTO.....  | 6         |
| 3.2       | LIMITI APPLICABILI NELL'AMBITO DEL PRESENTE STUDIO.....                          | 10        |
| <b>4.</b> | <b>AREA DI STUDIO .....</b>  | <b>12</b> |
| 4.1       | INQUADRAMENTO TERRITORIALE .....   | 12        |
| 4.2       | INQUADRAMENTO GEOLOGICO .....  | 13        |
| <b>5.</b> | <b>INDAGINI VIBRAZIONALI .....</b>   | <b>14</b> |
| 5.1       | RILIEVI DI VIBRAZIONI IN SITU .....  | 14        |
| 5.2       | METODOLOGIA DI ANALISI DEI DATI RILEVATI .....                                   | 17        |
| 5.3       | SINTESI DEI DATI RILEVATI.....   | 18        |
| <b>6.</b> | <b>MODELLO PREVISIONALE .....</b>  | <b>20</b> |
| 6.1       | LE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO .....                                 | 20        |
| 6.2       | CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE DI VIBRAZIONI .....                             | 22        |
|           | Interazione ruota-rotaia.....  | 22        |
|           | Velocità dei convogli.....   | 24        |
| 6.3       | LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO .....                               | 24        |
|           | La propagazione delle onde vibrazionali.....                                     | 24        |
|           | La determinazione della funzione di trasferimento .....                          | 26        |
| <b>7.</b> | <b>LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO.....</b>         | <b>28</b> |
| 7.1       | PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO .....                               | 28        |
| 7.2       | INDIVIDUAZIONE DELLE POTENZIALI AREE CRITICHE.....                               | 30        |
| <b>8.</b> | <b>CONCLUSIONI .....</b>   | <b>31</b> |

| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>  |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |         |
|---|--|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|---------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">COMMESSA</th> <th style="text-align: left;">LOTTO</th> <th style="text-align: left;">CODIFICA</th> <th style="text-align: left;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: left;">REV.</th> <th style="text-align: left;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">NP00</td> <td style="text-align: center;">00 D 22</td> <td style="text-align: center;">RG</td> <td style="text-align: center;">IM004002</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">2 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 2 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO  | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |         |
| NP00  | 00 D 22  | RG       | IM004002  | A        | 2 di 31   |      |        |      |         |    |          |   |         |

## ***1. PREMESSA***

La costruzione e l'esercizio di una linea tramviaria sono fonte di sollecitazioni dinamiche nel terreno circostante caratterizzate da una modesta fascia di influenza, limitata generalmente ai ricettori contermini l'infrastruttura. In questa fascia le vibrazioni possono generare disturbo alla popolazione residente o a determinate attività umane, ma risulta estremamente improbabile che esse possano causare effettivi danni alle strutture.

Il disturbo alle persone, definito in letteratura come annoyance, dipende dall'intensità e frequenza dell'evento disturbante e dal tipo di attività svolta. L'annoyance deriva dalla combinazione di effetti che coinvolgono la percezione uditiva e la percezione tattile delle vibrazioni. Gli effetti sulle persone sono estesi all'intero corpo e possono essere ricondotti genericamente ad un aumento dello stress, con conseguente attivazione di ripetute reazioni di orientamento e di adattamento, e con eventuale insorgenza o aggravamento di malattie ipertensive.

Le vibrazioni possono in alcune situazioni, od in presenza di caratteristiche di estrema suscettività strutturale o di elevati/prolungati livelli di sollecitazione dinamica, causare danni agli edifici. Tali situazioni si verificano tuttavia in corrispondenza di livelli di vibrazione notevoli, superiori di almeno un ordine di grandezza rispetto ai livelli tipici dell'annoyance.

Per la valutazione delle soglie di accettabilità relative a tali effetti sono state elaborate norme tecniche nazionali (UNI) e internazionali (ISO), le quali, pur non avendo validità di legge, forniscono un riferimento per la valutazione dei fenomeni vibratorii.

Il presente rapporto contiene i risultati dello studio relativo all'impatto vibrazionale prodotto dalla realizzazione del progetto di realizzazione della linea tramviaria denominata SIR3 del Comune di Padova.

L'iter metodologico seguito può essere schematizzato secondo le fasi di lavoro di seguito riportate:

- *Analisi della normativa applicabile e individuazione dei valori di riferimento.*

Analisi delle norme applicabili su base sia nazionale che internazionale e individuazione della metodologia e valori assunti come riferimento.

- *Caratterizzazione ante operam.*


Individuazione dei potenziali ricettori attraverso una indagine sul campo di censimento dei ricettori. A riguardo si è fatto riferimento al censimento ricettori dello studio acustico.

- *Rilevamento delle vibrazioni*

Le indagini sperimentali sono state eseguite in corrispondenza della linea attualmente in esercizio lungo sezioni tipologiche rappresentative di quelle di progetto. Le misure sono state finalizzate, oltre che alla valutazione dell'entità del livello vibrazionale allo stato attuale indotto dal transito dei convogli tramviari, anche alla costruzione di un modello sperimentale in relazione alle caratteristiche del terreno.

- *Individuazione delle aree critiche*

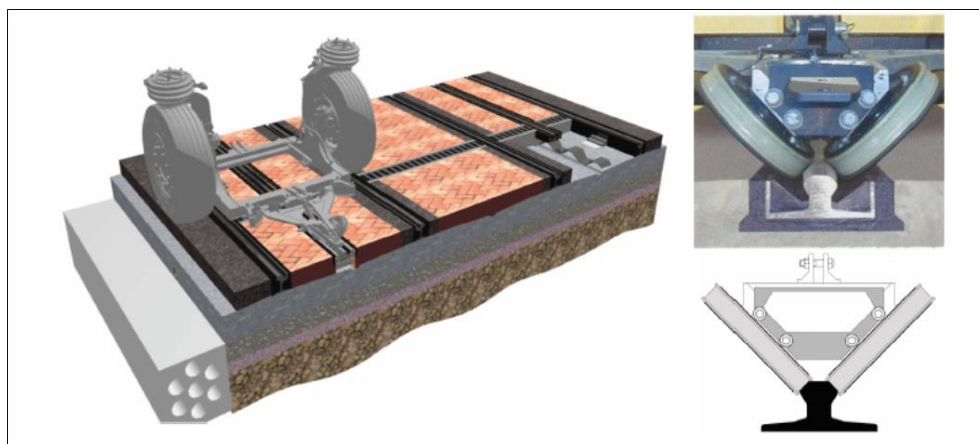
Sulla base del modello sperimentale individuato sono stati individuate le aree dove vi sono da attendersi dei superamenti dei valori di riferimento.

| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p> <p style="text-align: center;"><br/>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> <p>MANDANTE</p> <p>  </p> | <p style="text-align: center;"><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>  |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |         |
|--|--|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|---------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>   | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">COMMESSA</th> <th style="text-align: left;">LOTTO</th> <th style="text-align: left;">CODIFICA</th> <th style="text-align: left;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: left;">REV.</th> <th style="text-align: left;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">NP00</td> <td style="text-align: center;">00 D 22</td> <td style="text-align: center;">RG</td> <td style="text-align: center;">IM004002</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">3 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 3 di 31 |
| COMMESSA   | LOTTO  | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |         |
| NP00   | 00 D 22  | RG       | IM004002  | A        | 3 di 31   |      |        |      |         |    |          |   |         |

## *2. DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI TRASPORTO SU GOMMA A GUIDA VINCOLATA*





La linea tramviaria SIR3 di Padova implementa un sistema di trasporto su gomma a guida vincolata pensato esplicitamente per un inserimento in un contesto urbano senza pesanti interventi di modifica del piano viario al punto che, per una parte del tracciato, risulta essere predisposta per un traffico di tipo promiscuo potendo essere percorsa tanto dal tram, quanto dai mezzi di trasporto pubblici e privati. Anche nelle tratte dedicate solo al tram (sede riservata), in caso di necessità, la sede può essere percorsa dai normali mezzi pubblici su gomma.

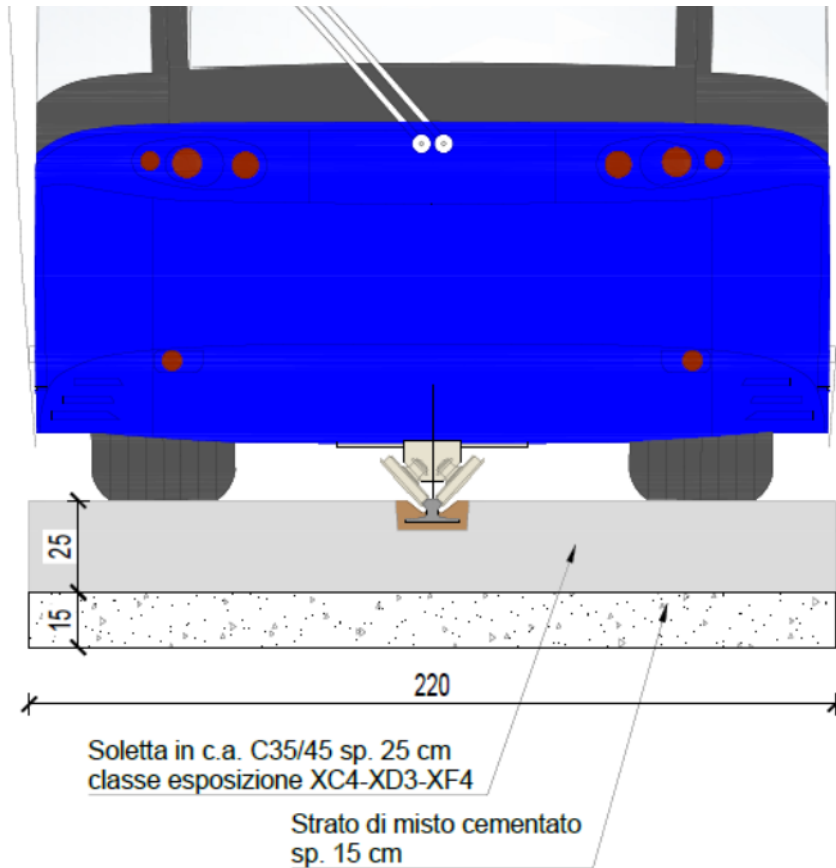
Il sistema di guida vincolata presenta quindi un impatto decisamente ridotto nel sistema infrastrutturale urbano di Padova, prevedendo la posa di una singola rotaia per ogni senso di marcia, priva di sporgenze dal piano viario. La rotaia è contenuta in una apposita canaletta, necessaria per accogliere i rulli di guida del sistema, avente dimensioni decisamente contenute; in tal modo la rotaia non viene percepita come “barriera fisica” nemmeno dai pedoni o dai ciclisti che necessariamente si troveranno ad intersecare in vario modo la linea tramviaria.



*Figura 2-1 Piattaforma tramviaria e sistema di guida vincolata*

La necessaria garanzia di mantenimento della planarità tra binario e piano viario percorso dalle ruote gommate del rotabile tramviario viene risolta con l’adozione di una platea di corsa in calcestruzzo armato avente le stesse dimensioni in larghezza del mezzo. Al fine di evitare possibili cedimenti o formazione di ormaie, la platea di calcestruzzo viene mantenuta alla quota della pavimentazione finita, senza ricoprimento in conglomerato bituminoso come le corsie stradali adiacenti, e opportunamente raccordata a questa. Viene in tal modo a costituirsi un piano tranviario visivamente marcato rispetto alla pavimentazione stradale rimanente; tale piano potrà eventualmente ancor essere più definito, per mezzo di apposita colorazione in pasta del calcestruzzo.

| <p>MANDATARIA</p>  <p>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> <p>MANDANTE</p>  <p>ASSOCIAZIONE PROFESSIONALE INGEGNERI</p> <p>MANDANTE</p>  <p>INGEGNERIA E ARCHITETTURA</p> <p>MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>  |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |         |
|--|--|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|---------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>   | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NP00</td> <td>00 D 22</td> <td>RG</td> <td>IM004002</td> <td>A</td> <td>4 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 4 di 31 |
| COMMESSA   | LOTTO  | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |         |
| NP00   | 00 D 22  | RG       | IM004002  | A        | 4 di 31   |      |        |      |         |    |          |   |         |






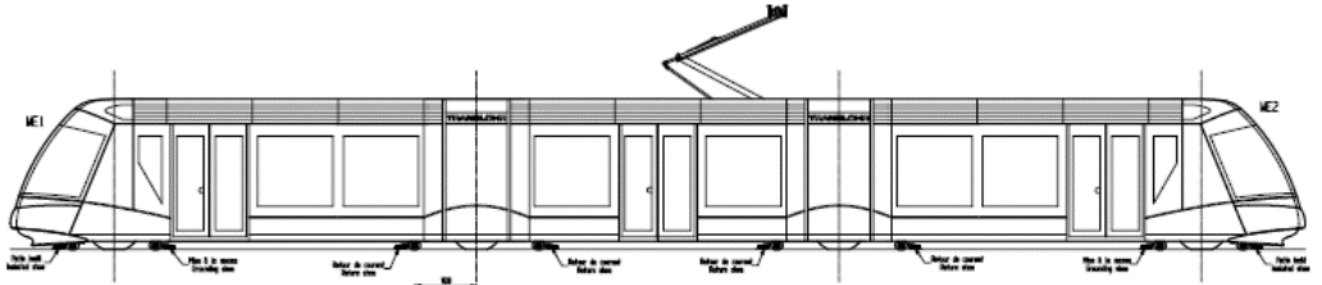
*Figura 2-2 Piattaforma tramviaria e caratteristiche materiale rotabile*

Il sistema di trasporto pubblico SIR3 viene esercito con rotabili tramviari alimentati elettricamente attraverso una linea aerea monofilare (750 Vcc) per la maggior parte del tracciato ad esclusione di due sub tratte in cui non è prevista la catenaria (catenary free) ed i rotabili sono alimentati con batterie di bordo: la prima tra la fermata Gozzi e la fermata Morgagni e la seconda sub tratta è prevista tra la fermata S. Antonio e la fermata Cornaro all'interno del Parco Iris.

La linea aerea di contatto è alimentata dalle tre sottostazioni elettriche di conversione (SSE) dislocate lungo il tracciato della linea tramviaria. Le SSE, oltre a fornire la potenza necessaria alla trazione, alimentano gli impianti di fermata, nonché gli impianti del deposito/officina presente al capolinea Voltabarozzo.

L'esercizio tramviario viene svolto utilizzando rotabili Translohr tipo STE3, un "veicolo tramviario su gomma" con rotaia direzionale centrale, di grande capacità di trasporto, ingombro ridotto, piattaforma ribassata su tutta la lunghezza del veicolo, bidirezionale, di elevata silenziosità di funzionamento soprattutto nelle curve, grazie all'assenza del contatto ferro su ferro.

| <p>MANDATARIA</p>  <p>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> <p>MANDANTE</p>  <p>ASSOCIAZIONE PROFESSIONALE INGEGNERI</p> <p>MANDANTE</p>  <p>INGEGNERIA E ARCHITETTURA</p> <p>MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>  |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |         |
|--|--|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|---------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>   | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NP00</td> <td>00 D 22</td> <td>RG</td> <td>IM004002</td> <td>A</td> <td>5 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 5 di 31 |
| COMMESSA   | LOTTO  | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |         |
| NP00   | 00 D 22  | RG       | IM004002  | A        | 5 di 31   |      |        |      |         |    |          |   |         |



*Figura 2-3 Rotabile Translohr STE3*

| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  | <p style="text-align: center;"><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>  |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |         |
|---|--|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|---------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">COMMESSA</th> <th style="text-align: left;">LOTTO</th> <th style="text-align: left;">CODIFICA</th> <th style="text-align: left;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: left;">REV.</th> <th style="text-align: left;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">NP00</td> <td style="text-align: center;">00 D 22</td> <td style="text-align: center;">RG</td> <td style="text-align: center;">IM004002</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">6 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 6 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO  | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |         |
| NP00  | 00 D 22  | RG       | IM004002  | A        | 6 di 31   |      |        |      |         |    |          |   |         |

### 3. RIFERIMENTI NORMATIVI

#### 3.1 Il quadro delle norme di riferimento

Benché le vibrazioni trasmesse agli edifici non siano mai state argomento di legiferazione da parte dello Stato Italiano è tuttavia universalmente riconosciuta la competenza in materia da parte dell'UNI – Milano, ente preposto alla redazione della normativa tecnica in ambito nazionale. L'UNI ha pubblicato negli anni una completa serie di norme (nazionali e/o recepimenti di norme internazionali) che coprono l'intera problematica delle vibrazioni negli edifici: la valutazione del disturbo alle persone, la valutazione del danno strutturale, l'implementazione della metodologia di misura ecc..

In particolare, la norma di interesse per il presente studio di impatto vibrazionale è la UNI 9614:2017 “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo”. Tale norma definisce il metodo di misura delle vibrazioni di origine ferrotranviaria immesse negli edifici ad opera di sorgenti esterne o interne agli edifici stessi. La norma concorda parzialmente con la norma internazionale ISO 2631/2.

La norma UNI 9916:2004 fornisce una guida per la scelta di appropriati metodi di misura, di trattamento dei dati e di valutazione dei fenomeni vibratorii per permettere la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica.

Vi sono poi norme internazionali di riferimento, fra cui:

- ISO 8041 Human response to vibration – Measuring instrumentation
- ISO 2631-1, Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General requirements, 1997;
- ISO 2631-2, Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz), 1989;
- ISO 5347, Metodi per la calibrazione dei rilevatori di vibrazioni;
- ISO 5348, Montaggio meccanico degli accelerometri;
- ISO 1683, Acoustics – Preferred reference quantities for acoustic levels, 1983;
- DIN 4150, Vibrations in building. Part 1: Principles, predetermination and measurement of the amplitude of oscillations, 1975.
- DIN 4150-2, Vibrations in building. Part 2: Influence on persons in buildings, 1975.
- DIN 4150-3, Vibrations in building. Part 3: Influence on constructions, 1975.

Non si possono infine trascurare alcune norme e linee guida particolarmente importanti per le valutazioni dell'impatto da **vibrazioni in ambito ferroviario**, fra cui:

| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  | <p style="text-align: center;"><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>  |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |         |
|---|--|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|---------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">COMMESSA</th> <th style="text-align: left;">LOTTO</th> <th style="text-align: left;">CODIFICA</th> <th style="text-align: left;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: left;">REV.</th> <th style="text-align: left;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">NP00</td> <td style="text-align: center;">00 D 22</td> <td style="text-align: center;">RG</td> <td style="text-align: center;">IM004002</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">7 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 7 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO  | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |         |
| NP00  | 00 D 22  | RG       | IM004002  | A        | 7 di 31   |      |        |      |         |    |          |   |         |

- ISO 14837-1 Mechanical vibration--Ground-borne noise and vibration arising from rail Systems - Part1: General guidance
- ISO 10811-1 (2000) Mechanical vibration and shock -- Vibration and shock in buildings with sensitive equipment -- Part 1: Measurement and evaluation
- ISO 10811-2 (2000) Mechanical vibration and shock -- Vibration and shock in buildings with sensitive equipment -- Part 2: Classification
- ISO 4866 (1990) Mechanical vibration and shock -- Vibration of fixed structures -- Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures
- Report FTA-VA-90-1003-06 Transit Noise and Vibration Impact Assessment (Office of Planning and Environment Federal Transit Administration – USA)
- SS 460 48 61 (Swedish standard): Vibration och stöt – Mätning och riktvärden för bedömning av komfort i byggnader
- NS 8176 (Norwegian Standard): Vibration and shock Measurement of vibration in buildings from landbased transport and guidance to evaluation of its effects on human beings (Vibrasjoner og støt – Måling i bygninger av vibrasjoner fra landbasert samferdsel og veiledning for bedømmelse av virkning på mennesker)
- Norwegian standard NS 8141 (NSF, 2001)
- Swedish standard SS 460 48 66 (SEK, 1991)


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

### **UNI 9614:2017 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo"**

La norma è sostanzialmente in accordo con la ISO 2631-2. Tuttavia, sebbene le modalità di misura siano le stesse, la valutazione del disturbo è effettuata sulla base del valore di accelerazione delle vibrazioni immesse nell’edificio dalla specifica sorgente oggetto di indagine ( $V_{sor}$ ), quale valore pari al 95esimo percentile della distribuzione cumulata di probabilità della massima accelerazione ponderata  $a_{w,max}$  misurata sui singoli eventi. Tale valore viene confrontato con una serie di limiti individuati per gli edifici a seconda della destinazione d’uso e dal periodo temporale di riferimento (diurno 6:00-22:00, notturno 22:00-6:00).

I livelli di soglia indicati dalla suddetta norma sono riportati nella tabella seguente:



|   |   |  |                       |                              |                  |                          |
|---|---|--|-----------------------|------------------------------|------------------|--------------------------|
|  |  | <b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                       |                              |                  |                          |
| <b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b>                                   | COMMESSA<br><b>NP00</b>   | LOTTO<br><b>00 D 22</b>  | CODIFICA<br><b>RG</b> | DOCUMENTO<br><b>IM004002</b> | REV.<br><b>A</b> | FOGLIO<br><b>8 di 31</b> |




| <b>Luogo</b>                     | <b>Accelerazione<br/>[m/s<sup>2</sup>]</b> |
|----------------------------------|--|
| Abitazioni (notte)               | $3.6 \cdot 10^{-3}$                        |
| Abitazioni (giorno)              | $7.2 \cdot 10^{-3}$                        |
| Luoghi lavorativi                | $14.4 \cdot 10^{-3}$                       |
| Ospedali, case di cura,<br>ecc.. | $2 \cdot 10^{-3}$                          |
| Asili e case di risposo          | $3.6 \cdot 10^{-3}$                        |
| Scuole                           | $5.4 \cdot 10^{-3}$                        |

*Tabella 3-1 Valori di soglia di vibrazione relativi al disturbo alle persone (UNI 9614:2017)*

Le misure devono essere eseguite in conformità alla suddetta norma tecnica. In particolare, la durata complessiva è legata al numero di eventi del fenomeno in esame necessaria ad assicurare una ragionevole accuratezza statistica, tenendo conto non solo della variabilità della sorgente ma anche dell'ambiente di misura. Nel caso di infrastrutture ferroviarie, il singolo evento è costituito dal passaggio dell'intero singolo convoglio sul binario, che, quando esistano più binari paralleli, dà luogo ad accelerazioni ponderate più elevate. Il numero minimo di eventi da considerare è 15 (appendice A2: vibrazioni prodotte da traffico ferrotramviario).

### **UNI 9916:2004 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici"**

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

| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>  |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |         |
|---|--|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|---------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">COMMESSA</th> <th style="text-align: center;">LOTTO</th> <th style="text-align: center;">CODIFICA</th> <th style="text-align: center;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: center;">REV.</th> <th style="text-align: center;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">NP00</td> <td style="text-align: center;">00 D 22</td> <td style="text-align: center;">RG</td> <td style="text-align: center;">IM004002</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">9 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 9 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO  | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |         |
| NP00  | 00 D 22  | RG       | IM004002  | A        | 9 di 31   |      |        |      |         |    |          |   |         |

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

Le strutture comprese nella classificazione riguardano:

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

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




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

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

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

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

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

| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">COMMESSA</th> <th style="text-align: center;">LOTTO</th> <th style="text-align: center;">CODIFICA</th> <th style="text-align: center;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: center;">REV.</th> <th style="text-align: center;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">NP00</td> <td style="text-align: center;">00 D 22</td> <td style="text-align: center;">RG</td> <td style="text-align: center;">IM004002</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">10 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 10 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 10 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |




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

Per velocità massima è da intendersi la velocità massima di picco. Essa è ricavabile dalla velocità massima r.m.s. attraverso la moltiplicazione di quest'ultima con il fattore di cresta F. Tale parametro esprime il rapporto tra il valore di picco e il valore efficace. Per onde sinusoidali si assume  $F = 1.41$ ; in altri casi si possono assumere valori maggiori. Nei casi più critici (ed es. esplosioni di mina) F può raggiungere il valore 6. La ISO 4866 fornisce infine una classificazione degli effetti di danno a carico delle strutture secondo tre livelli:





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

### 3.2 Limiti applicabili nell'ambito del presente studio

Ai fini del presente studio vibrazionale, finalizzato alla valutazione delle immissioni di vibrazioni indotte dal transito dei tram lungo la linea di progetto e alla stima dell'interferenza sui potenziali ricettori all'interno della fascia di studio considerata, sono stati considerati i seguenti criteri e quindi i seguenti valori limite assunti come riferimento dalla norma UNI 9614:2017 la quale risulta maggiormente restrittiva rispetto alla norma UNI 9916 e pertanto si hanno delle condizioni più cautelative.

|   |   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
| <p>MANDATARIA</p>  <p>MANDANTE</p>  <p>MANDANTE</p>  <p>MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">COMMESSA</td> <td style="text-align: center;">LOTTO</td> <td style="text-align: center;">CODIFICA</td> <td style="text-align: center;">DOCUMENTO</td> <td style="text-align: center;">REV.</td> <td style="text-align: center;">FOGLIO</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">NP00</td> <td style="text-align: center;">00 D 22</td> <td style="text-align: center;">RG</td> <td style="text-align: center;">IM004002</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">11 di 31</td> </tr> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 11 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 11 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |

| Tipologia immissione   | Criterio di valutazione / norma di riferimento | Parametro di valutazione | Limiti applicabili  |
|--|--|--------------------------|---|
| Vibrazioni da esercizio linea tramviaria – disturbo alle persone | UNI 9614:2017                                  | $V_{sor}$                | <p>Ambienti ad uso abitativo: 7,2 mm/s<sup>2</sup> (periodo diurno), 3,6 mm/s<sup>2</sup> (periodo notturno), 5,4 mm/s<sup>2</sup> (periodo diurno di giornate festive)</p> <p>Luoghi lavorativi: 14,4 mm/s<sup>2</sup></p> <p>Ospedali, case di cura ed affini: 2 mm/s<sup>2</sup></p> <p>Asili e case di riposo: 3,6 mm/s<sup>2</sup></p> <p>Scuole: 5,4 mm/s<sup>2</sup></p> |

| <p>MANDATARIA</p>  <p>MANDANTE</p>  <p>MANDANTE</p>  <p>MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NP00</td> <td>00 D 22</td> <td>RG</td> <td>IM004002</td> <td>A</td> <td>12 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 12 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 12 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |

## 4. AREA DI STUDIO

### 4.1 Inquadramento territoriale

Nella figura seguente è rappresentata l'area geografica in cui si localizza l'intervento oggetto di studio.



*Figura 4-1 Vista aerea dell'inquadramento generale dell'intervento oggetto di studio*

Si tratta di un'area compresa nel territorio della città di Padova che si sviluppa nel quadrante sud-est della città su un territorio morfologicamente pianeggiante.

I ricettori sono costituiti da tutti gli edifici, prevalentemente residenziali e multipiano, di solito tra i due ed i quattro piani di altezza, localizzati lungo il tratto di linea tramviaria oggetto di studio.

Allo scopo di valutare correttamente l'impatto si è calcolata la distanza reale dei ricettori potenzialmente influenzati tenendo conto della effettiva distanza del ricettore dall'opera oggetto d'indagine.

|   |  |  |                                  |   |                             |                                      |
|---|--|--|----------------------------------|---|-----------------------------|--------------------------------------|
| <p>MANDATARIA</p>  <p>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>        |  |                                  |   |                             |                                      |
| <p>MANDANTE</p>  <p>ASSOCIAZIONE PROFESSIONALE INGEGNERI</p>   | <p>MANDANTE</p>  <p>INGEGNERIA E ARCHITETTURA</p> | <p>MANDANTE</p>  <p>SWISS</p> |                                  |   |                             |                                      |
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <p>COMMESSA</p> <p><b>NP00</b></p>   | <p>LOTTO</p> <p><b>00 D 22</b></p>   | <p>CODIFICA</p> <p><b>RG</b></p> | <p>DOCUMENTO</p> <p><b>IM004002</b></p> | <p>REV.</p> <p><b>A</b></p> | <p>FOGLIO</p> <p><b>13 di 31</b></p> |

## 4.2 Inquadramento geologico

L'area di studio si estende in corrispondenza di un'unità fluvioglaciale di età pleistocenica ed è costituita per lo più finì da terreni alluvionali, quindi limi ed argille, a medio-bassa permeabilità localmente intervallati da depositi più permeabili, caratterizzati da sabbie e limi sabbiosi, con coperture limoso-argillose formatesi per decantazione successiva a fenomeni di esondazione e piena, localizzabili nella maggior parte dei casi in corrispondenza di vecchi paleoalvei, testimonianza delle divagazioni del fiume Brenta. Si riporta a seguito un estratto della Carta litologica del PTCP della provincia di Padova.

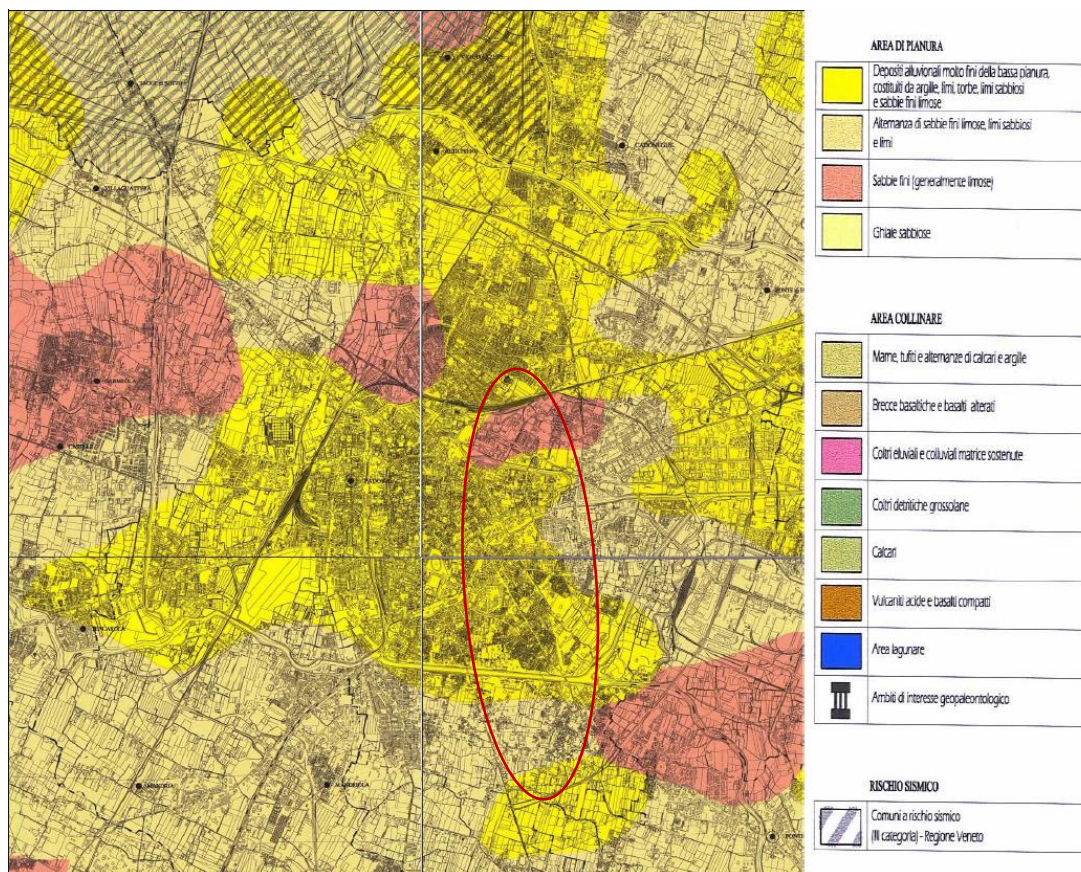






Figura 4-2 Estratto della Carta litologica della provincia di Padova .

| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">COMMESSA</th> <th style="text-align: left;">LOTTO</th> <th style="text-align: left;">CODIFICA</th> <th style="text-align: left;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: left;">REV.</th> <th style="text-align: left;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">NP00</td> <td style="text-align: center;">00 D 22</td> <td style="text-align: center;">RG</td> <td style="text-align: center;">IM004002</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">14 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 14 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 14 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |

## 5. INDAGINI VIBRAZIONALI

### 5.1 Rilievi di vibrazioni in situ




E' stata eseguita una campagna di rilievi vibrometrici in corrispondenza di due sezioni lungo l'attuale linea tramviaria di Padova. Tale attività è finalizzata alla caratterizzazione della propagazione delle vibrazioni tramviarie in una condizione analoga a quella prevista per il progetto oggetto di studio essendo analoghe le condizioni al contorno, ovvero:

- Contesto geologico di riferimento;
- Tipologia dei convogli tramviari;
- Opere civili tramviarie.

Come detto le indagini sono state eseguite in due differenti sezioni. Ciascuna sezione è costituita da due terne di accelerometri posizionati in corrispondenza della linea tranviaria per un periodo di misura limitato e rappresentativo per la caratterizzazione della sorgente tranviaria. le misure sono state effettuate laddove la linea esistente presenta caratteristiche simili a quelle di progetto, ovvero:

- Sezione 1 (VIB-1): in prossimità del civico 51 in via Santa Maria Assunta lungo la linea Pontevigodarzere - Guizza laddove la linea si sviluppa su un singolo binario.
- Sezione 2 (VIB-2): in corrispondenza dell'incrocio tra via Guizza Conselvana e via I. Svevo lungo la linea Pontevigodarzere - Guizza laddove la linea si sviluppa su due binari in affiancamento.

Ciascuna misura è costituita da due terne accelerometriche in grado di rilevare le immissioni vibrazionali totali e specifiche dei transiti ferroviari lungo i tre assi X, Y e Z. Per ciascuna misura è stato eseguito un campionamento di 40 minuti utile per la caratterizzazione delle sorgenti tramviarie. Durante tale arco temporale sono stati rilevati per la sezione 1 un numero totale di 10 transiti e per la sezione 2 un numero totale di 12 transiti.

| <p>MANDATARIA</p>  <p>MANDANTE</p>  <p>MANDANTE</p>  <p>MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NP00</td> <td>00 D 22</td> <td>RG</td> <td>IM004002</td> <td>A</td> <td>15 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 15 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 15 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |







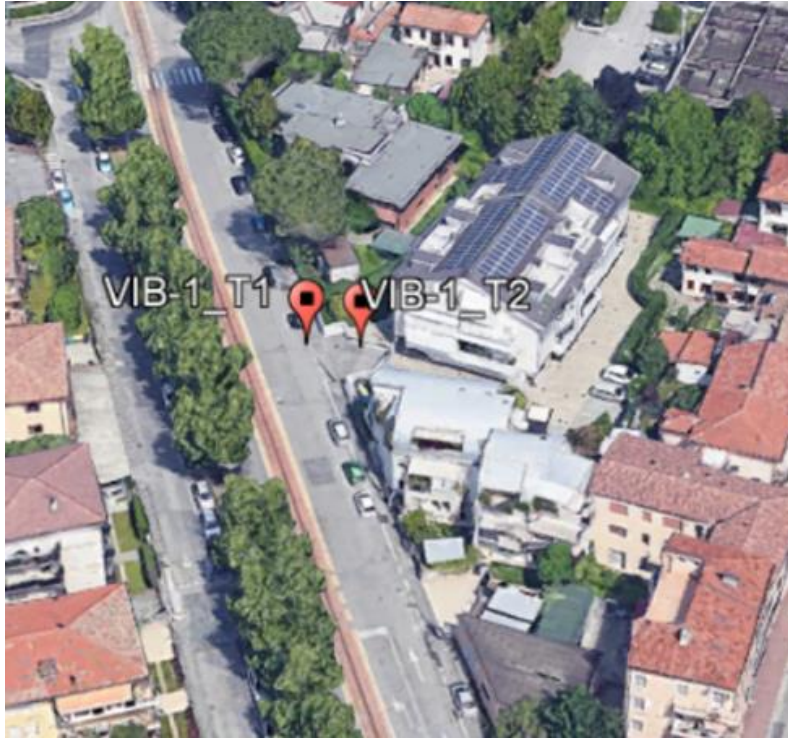
*Figura 5-1 Localizzazione dei punti di misura*

Le misure sono state eseguite secondo le modalità indicate dalla norma UNI 9614:2017. I vibrometri sono stati posizionati sul terreno ad una distanza di 7 metri e 13 metri dell'asse tranviario per la sezione 1. Invece per quanto riguarda la sezione 2, i vibrometri sono stati posizionati rispettivamente ad una distanza di 5 metri e 10 metri dall'asse tranviario.

La posizione degli accelerometri dipende dalle condizioni del sito di misura e delle possibili interferenze con la viabilità locale.






| <p>MANDATARIA</p>  <p>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> <p>MANDANTE</p>  <p>ASSOCIAZIONE PROFESSIONALE INGEGNERI</p> <p>MANDANTE</p>  <p>INGEGNERIA E ARCHITETTURA</p> <p>MANDANTE</p>  <p>SWISS</p> | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NP00</td> <td>00 D 22</td> <td>RG</td> <td>IM004002</td> <td>A</td> <td>16 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 16 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 16 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |



*Figura 5-2 Rilievi in situ: sezione VIB-1, localizzazione dei punti di monitoraggio delle vibrazioni rispetto al piano del ferro*



*Figura 5-3 Rilievi in situ: sezione VIB-2, localizzazione dei punti di monitoraggio delle vibrazioni rispetto al piano del ferro*

| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p> <p style="text-align: center;"><br/>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> <p>MANDANTE</p> <p>  </p> | <p style="text-align: center;"><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|--|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>   | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">COMMESSA</th> <th style="text-align: left;">LOTTO</th> <th style="text-align: left;">CODIFICA</th> <th style="text-align: left;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: left;">REV.</th> <th style="text-align: left;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">NP00</td> <td style="text-align: left;">00 D 22</td> <td style="text-align: left;">RG</td> <td style="text-align: left;">IM004002</td> <td style="text-align: left;">A</td> <td style="text-align: left;">17 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 17 di 31 |
| COMMESSA   | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00   | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 17 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |

## 5.2 Metodologia di analisi dei dati rilevati

Il metodo di analisi ed elaborazione utilizzato per la determinazione dei parametri di riferimento per la valutazione del disturbo è quello indicato dalla normativa UNI 9614:2017. L'elaborazione del segnale corrispondente ad ogni singolo evento prevede pertanto i seguenti passaggi:

- **Filtraggio con filtro passa banda e con filtro di ponderazione  $W_m$**

I valori rilevati dal singolo strumento vengono filtrati con un filtro passa banda, con caratteristiche conformi a quelle indicate dalla norma UNI 9614:2017, e successivamente con il filtro di ponderazione  $W_m$ .

- **Calcolo del valore efficace della accelerazione assiale ponderata**

Per l'intera storia temporale del segnale ponderato viene calcolato l'andamento del tempo del valore efficace dell'accelerazione ponderata per ogni singolo asse cartesiano. Il tempo di integrazione è pari ad 1 secondo.

- **Calcolo dell'accelerazione ponderata totale efficace  $a_w(t)$**

Il calcolo dell'accelerazione ponderata totale efficace  $a_w(t)$  viene eseguito istante per istante come combinazione a partire dalle tre accelerazioni assiali ponderate mediante l'equazione indicata dalla UNI 9614:2017 (par. 8.3).

- **Individuazione degli eventi di origine tramviaria**

A partire dai dati di traffico rilevati nel periodo di misura sono stati individuati gli eventi di origine tramviaria e l'andamento temporale della  $a_w(t)$  in un periodo rappresentativo del transito del convoglio.

- **Calcolo della accelerazione massima ponderata  $a_{w,max,j}$  e della massima accelerazione statistica  $a_{w,95}$**

Tali valori sono stati calcolati secondo le modalità indicate ai paragrafi 8.4 e 8.5 della UNI 9614:2017. Tale valore è stato utilizzato per la determinazione della  $V_{imm}$ , ovvero della accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni immesse.

- **Calcolo della accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni residue  $V_{res}$**

Dall'andamento della  $a_w(t)$  nell'intero periodo di misura, una volta estratti i valori rappresentativi dell'evento tramviario, è stato determinato il contributo emissivo vibrazionale associato alle altre

|   |   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
|   | <b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b>  |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
| <b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b> | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">COMMESSA</td> <td style="text-align: center;">LOTTO</td> <td style="text-align: center;">CODIFICA</td> <td style="text-align: center;">DOCUMENTO</td> <td style="text-align: center;">REV.</td> <td style="text-align: center;">FOGLIO</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">NP00</td> <td style="text-align: center;">00 D 22</td> <td style="text-align: center;">RG</td> <td style="text-align: center;">IM004002</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">18 di 31</td> </tr> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 18 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 18 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |

sorgenti caratterizzanti il sito di misura. Da tale analisi è stato calcolato il valore statistico delle vibrazioni presenti in assenza della sorgente tranviaria.

- **Calcolo della accelerazione ponderata massima statistica della sorgente  $V_{sor}$**

Dai valori precedentemente calcolati della  $V_{imm}$  e  $V_{res}$ , si calcola il valore dell'accelerazione associata alla sorgente ferroviaria che nelle successive fasi di studio viene confrontato con i valori limite di riferimento indicati dalla norma UNI 9614:2017 per ciascun edificio secondo la destinazione d'uso.

### 5.3 Sintesi dei dati rilevati

Rimandando ai report delle indagini NP0000D22RHIM000 4002A, di seguito si riporta la sintesi dei valori ottenuti per ciascun transito nelle due terne di ciascuna sezione e i valori complessivi della  $V_{imm}$ ,  $V_{res}$  e  $V_{sor}$ .

| <i>Evento</i> | <i>Cat.</i>       | <i>Data</i> | <i>Orario</i> | <i><math>a_w</math> MAX TERNA 1<br/>[mm/s<sup>2</sup>]</i> | <i><math>a_w</math> MAX TERNA 2<br/>[mm/s<sup>2</sup>]</i> |
|---------------|-------------------|-------------|---------------|--|--|
| 1             | NLT Translohr STE | 19/02/2020  | 12:44:31      | 2,87   | 1,88   |
| 2             | NLT Translohr STE | 19/02/2020  | 12:50:51      | 1,10   | 0,76   |
| 3             | NLT Translohr STE | 19/02/2020  | 12:56:29      | 1,89   | 0,80   |
| 4             | NLT Translohr STE | 19/02/2020  | 13:02:06      | 1,14   | 2,34   |
| 5             | NLT Translohr STE | 19/02/2020  | 13:07:24      | 6,03   | 0,67   |
| 6             | NLT Translohr STE | 19/02/2020  | 13:12:31      | 3,15   | 0,68   |
| 7             | NLT Translohr STE | 19/02/2020  | 13:19:31      | 1,83   | 0,68   |
| 8             | NLT Translohr STE | 19/02/2020  | 13:27:19      | 2,46   | 0,69   |
| 9             | NLT Translohr STE | 19/02/2020  | 13:34:23      | 1,72   | 1,04   |
| 10            | NLT Translohr STE | 19/02/2020  | 13:38:24      | 1,23   | 0,67   |

*Tabella 5-1 Rilievi in situ: sezione VIB-1, valori della massima accelerazione ponderata in mm/s<sup>2</sup> in corrispondenza delle terne T1 e T2 della sezione calcolate per ciascun transito tranviario*

|   |   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
|   | <b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b>  |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
| <b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b> | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">COMMESSA</td> <td style="text-align: center;">LOTTO</td> <td style="text-align: center;">CODIFICA</td> <td style="text-align: center;">DOCUMENTO</td> <td style="text-align: center;">REV.</td> <td style="text-align: center;">FOGLIO</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">NP00</td> <td style="text-align: center;">00 D 22</td> <td style="text-align: center;">RG</td> <td style="text-align: center;">IM004002</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">19 di 31</td> </tr> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 19 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 19 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |

| <i>Evento</i> | <i>Cat.</i>       | <i>Data</i> | <i>Orario</i> | <i>a<sub>w</sub> MAX TERNA 1<br/>[mm/s<sup>2</sup>]</i> | <i>a<sub>w</sub> MAX TERNA 2<br/>[mm/s<sup>2</sup>]</i> |
|---------------|-------------------|-------------|---------------|---|---|
| 1             | NLT Translohr STE | 20/02/2020  | 09:54:03      | 9,14  | 0,75  |
| 2             | NLT Translohr STE | 20/02/2020  | 09:54:23      | 12,4  | 0,72  |
| 3             | NLT Translohr STE | 20/02/2020  | 09:56:03      | 9,06  | 1,31  |
| 4             | NLT Translohr STE | 20/02/2020  | 10:01:22      | 7,19  | 0,68  |
| 5             | NLT Translohr STE | 20/02/2020  | 10:05:33      | 6,62  | 1,48  |
| 6             | NLT Translohr STE | 20/02/2020  | 10:09:23      | 3,5   | 0,85  |
| 7             | NLT Translohr STE | 20/02/2020  | 10:09:32      | 5,56  | 1,32  |
| 8             | NLT Translohr STE | 20/02/2020  | 10:13:31      | 5,96  | 1,04  |
| 9             | NLT Translohr STE | 20/02/2020  | 10:17:15      | 5,01  | 1,26  |
| 10            | NLT Translohr STE | 20/02/2020  | 10:20:07      | 10,47   | 8,31  |
| 11            | NLT Translohr STE | 20/02/2020  | 10:26:11      | 3,69  | 1,14  |
| 12            | NLT Translohr STE | 20/02/2020  | 10:27:08      | 6,5   | 0,99  |




*Tabella 5-2 Rilievi in situ: sezione VIB-2, valori della massima accelerazione ponderata in mm/s<sup>2</sup> in corrispondenza delle terne T1 e T2 della sezione calcolate per ciascun transito tranviario*

Ne consegue che per ciascuna terna, i valori delle  $V_{res}$ ,  $V_{imm}$  e  $V_{sor}$  risultano essere i seguenti.

|                                | <i>Sezione 1 – punto VIB-1</i> |           | <i>Sezione 2 – punto VIB-2</i> |           |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|
|                                | <i>T1</i>                      | <i>T2</i> | <i>T1</i>                      | <i>T2</i> |
| $V_{imm}$ [mm/s <sup>2</sup> ] | 3,4                            | 1,5       | 9,3                            | 3,4       |
| $V_{res}$ [mm/s <sup>2</sup> ] | 8,3                            | 5,5       | 6,9                            | 5,9       |
| $V_{sor}$ [mm/s <sup>2</sup> ] | -                              | -         | 6,2                            | -         |

*Tabella 5-3 Rilievi in situ: sintesi dei valori di accelerazione in mm/s<sup>2</sup> calcolati in corrispondenza delle terne T1 e T2 nelle due sezioni di misura*

Il calcolo delle accelerazioni massime statistiche residue  $V_{res}$  è stato eseguito considerando tutti gli intervalli temporali nei due periodi di misura tra due transiti tranviari consecutivi e applicando la stessa metodologia di calcolo indicata dalla UNI 9614:2017. Laddove i valori delle accelerazioni residue  $V_{res}$  risultano maggiori di quelli immessi  $V_{imm}$ , il calcolo della  $V_{sor}$  è considerato trascurabile in accordo con la norma UNI 9614:2017 (par. 9.3)

| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">COMMESSA</th> <th style="text-align: left;">LOTTO</th> <th style="text-align: left;">CODIFICA</th> <th style="text-align: left;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: left;">REV.</th> <th style="text-align: left;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">NP00</td> <td style="text-align: center;">00 D 22</td> <td style="text-align: center;">RG</td> <td style="text-align: center;">IM004002</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">20 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 20 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 20 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |

## 6. MODELLO PREVISIONALE

### 6.1 Le vibrazioni indotte in fase di esercizio

I treni che si muovono su un percorso ferrato eccitano i binari e il relativo sottofondo su cui essi poggiano. Le vibrazioni così generate si propagano nel terreno circostante, sia terreno o roccia, sotto forma di vibrazioni per via solida. Le modalità di propagazione dipendono dalla composizione del terreno, che può influenzare pesantemente l'ampiezza e la stessa velocità di propagazione. 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 (di bassa frequenza). Le vibrazioni possono anche provocare danni strutturali o causare disturbo a macchine sensibili alle vibrazioni. Si è soliti considerare il problema dell'impatto da vibrazioni attraverso una analisi in tre fasi:

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





La vibrazione prodotta dai veicoli ferroviari attraverso la rotaia su cui poggia raggiunge la struttura di appoggio sottostante, che può essere costituita da strutture più o meno complesse in grado di attenuare le vibrazioni (dove si ritiene necessario allo scopo di ridurre l'impatto verso ricettori sensibili).

Le onde di superficie (onde di Rayleigh, che si propagano appunto lungo una 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. 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.

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

La propagazione nel corpo dell'edificio è determinante sia per gli abitanti che per le strutture in quanto pavimenti, pareti e soffitti degli edifici sono soggetti a significative amplificazioni delle vibrazioni rispetto a

| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">COMMESSA</th> <th style="text-align: left;">LOTTO</th> <th style="text-align: left;">CODIFICA</th> <th style="text-align: left;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: left;">REV.</th> <th style="text-align: left;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">NP00</td> <td style="text-align: center;">00 D 22</td> <td style="text-align: center;">RG</td> <td style="text-align: center;">IM004002</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">21 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 21 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 21 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |

quelle trasmesse dalle fondazioni. I problemi maggiori si verificano quando la frequenza propria dei solai coincide con la frequenza di picco dello spettro di vibrazione del terreno. In tali casi è anche possibile la comparsa di disturbo da rumore per reirradiazione delle strutture.

Le vibrazioni dovute all'esercizio ferroviario sono originate dalle azioni all'interfaccia ruota-rotaia, indotte dalla rugosità delle superfici di rotolamento, che si propagano dal veicolo in transito agli edifici circostanti attraverso la struttura del terreno. La vibrazione risultante viene percepita come moto meccanico degli elementi componenti l'edificio.

Nel caso di tracciati caratterizzati dalla presenza di tratti in rilevato le vibrazioni al terreno sono generalmente comprese tra i 20 e gli 80 Hz, con livelli di accelerazione dell'ordine di 60-70 dB<sub>1</sub>, per distanze da 15 a 30 metri dalla linea ferroviaria con velocità di esercizio sino a 100 Km/h.

Le vibrazioni all'interno degli edifici sono spesso vicine alla soglia di sensibilità umana e pertanto valutazioni adeguate debbono essere effettuate, mettendo correttamente in conto caso per caso le variabilità presenti nelle caratteristiche del suolo e nelle soluzioni progettuali adottate per gli edifici. L'impiego di misure di controllo delle vibrazioni può risultare efficace, se necessario, per ridurre i disturbi all'interno degli edifici.




Uno studio finalizzato ad una valutazione previsionale degli effetti nocivi delle vibrazioni e ai benefici prodotti dagli interventi mitigativi proposti non può pertanto prescindere dall'analisi dei tre elementi della catena di trasmissione (sorgente, mezzo di trasmissione e ricettore). Le vibrazioni che si propagano nel suolo circostante assumono la forma di onde elastiche, che si propagano come onde di volume e come onde di superficie.

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 (onde di Rayleigh, che si propagano appunto lungo una 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

<sup>1</sup> 0 dB  $\cong$  1  $\mu$ m/s<sup>2</sup>

| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">COMMESSA</th> <th style="text-align: left;">LOTTO</th> <th style="text-align: left;">CODIFICA</th> <th style="text-align: left;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: left;">REV.</th> <th style="text-align: left;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NP00</td> <td>00 D 22</td> <td>RG</td> <td>IM004002</td> <td>A</td> <td>22 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 22 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 22 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |

che complicano il modello di propagazione ideale, che dunque diventa assai complesso e tale da richiedere un approccio matematico estremamente arduo.

In generale gli aspetti che intervengono nel condizionare l'importanza del disturbo vibrazionale negli edifici si possono riassumere nei seguenti punti:

- Interazione ruota- rotaia
- Velocità del treno
- Comportamento corpo ferroviario: tipo e dimensioni della linea (tunnel, trincea, superficie, rilevato, viadotto); spessore delle pareti della infrastruttura in tunnel o in trincea
- Trasmissione nel terreno: natura e caratteristiche del suolo; leggi di attenuazione nel suolo.

Nei successivi sotto paragrafi vengono esaminati nel dettaglio i più importanti aspetti che influenzano il disturbo vibrazionale e le modalità con cui sono stati considerati nell'elaborazione del modello previsionale.

## 6.2 Caratterizzazione della sorgente di vibrazioni

### Interazione ruota-rotaia

La sorgente di vibrazioni tramviaria consiste nel movimento del treno lungo la rotaia e dalle conseguenti forze che nascono nell'interazione fra ruota, rotaia e struttura di appoggio della rotaia. I tram, in fase di riposo, esercitano una forza statica data dal peso trasmesso dalle ruote alle rotaie e distribuito dalla rotaia stessa, dal supporto e dal terreno: si tratta del carico statico. Quando il tram si mette in movimento questa forza si sposta insieme al tram stesso, ma a causa delle imperfezioni e irregolarità superficiali di ruota, rotaia nonché delle variazioni nel tipo di supporto della rotaia il carico statico eserciterà una forza dinamica, che si trasforma in vibrazioni generate nel punto di contatto ruota-rotaia e trasmesse nel terreno circostante. I parametri che influenzano il livello e le caratteristiche delle vibrazioni indotte dal passaggio del treno sono:

- **Vibrazioni indotte dalla risposta della struttura del binario:**
  - Carico statico assiale (peso del treno e spaziatura interassiale);
  - Geometria e composizione del treno (tipo, lunghezza...);
  - Velocità del treno.
- **Interfaccia ruota-rotaia**
  - Imperfezioni della ruota (eccentricità, sbilanciamento, zone piatte, asperità);

|   |  |         |          |           |      |          |
|---|--|---------|----------|-----------|------|----------|
|   | <b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b> |         |          |           |      |          |
| <b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b> | COMMESSA   | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO   |
|   | NP00   | 00 D 22 | RG       | IM004002  | A    | 23 di 31 |



- Andatura instabile dei veicoli ferroviari;
- Accelerazione e decelerazione del convoglio.
- **Imperfezioni della rotaia**
  - Qualità della rotaia (corrugamenti, corrosione, asperità, giunti...),
  - Curve e chicane (forze centrifughe)
- **Variazioni nella struttura di supporto**
  - Geometria e rigidità della struttura di supporto,
  - Presenza di ghiaccio.

Un aumento del carico assiale aumenta ovviamente il carico dinamico generato dal passaggio del convoglio. Il raddoppio del carico assiale può aumentare i livelli di vibrazione da 2 a 4 dB (Kurzweil, 1979). La composizione dei treni ha inoltre un impatto notevole sulla generazione di vibrazioni, così come la velocità stessa del treno può portare a notevoli incrementi di vibrazione: secondo Kurzweil (1979) un raddoppio della velocità può comportare un aumento di vibrazione da 4 a 6 dB. Le imperfezioni superficiali della rotaia e della ruota sono la causa principale delle vibrazioni: le tipiche irregolarità superficiali delle ruote sono zone lisce (piatte) dovute alla frenatura. Le irregolarità della rotaia possono essere costituite da giunti fra spezzoni di rotaia (rotaie non saldate), corrugamenti, asperità o altro ancora. Secondo Kurzweil questi difetti possono aumentare i livelli di vibrazione da 10 a 20 dB. Altre cause di vibrazione sono le curve, accelerazioni/decelerazioni del treno, guida instabile dei veicoli, etc.

Come descritto sopra, il carico generato dai tram è dovuto ad un carico statico, dovuto al peso del treno, e ad un carico dinamico, generato dalle imperfezioni della rotaia, ruote, struttura di appoggio. I carichi dinamici variano il carico (e quindi la forza) complessiva trasmessa nella misura percentuale relativa al carico statico descritta nella seguente tabella.

| <b>Tipo di carico</b> | <b>Carico</b>                                  | <b>Contributo</b> |
|-----------------------|--|-------------------|
| Statico               | Peso del tram                                  | 100%              |
| Dinamico              | Contributo quasi-statico nelle curve           | 10-40%            |
| “                     | Contributo dovuto ad asperità delle rotaie     | 50 – 300%         |
| “                     | Contributo dovuto ad asperità delle ruote      | 50 – 300 %        |
| “                     | Contributo dovuto ad accelerazioni e frenature | 5 – 20 %          |



| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">COMMESSA</th> <th style="text-align: left;">LOTTO</th> <th style="text-align: left;">CODIFICA</th> <th style="text-align: left;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: left;">REV.</th> <th style="text-align: left;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">NP00</td> <td style="text-align: left;">00 D 22</td> <td style="text-align: left;">RG</td> <td style="text-align: left;">IM004002</td> <td style="text-align: left;">A</td> <td style="text-align: left;">24 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 24 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 24 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |

## Velocità dei convogli

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

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

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

dove:

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

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

### 6.3 La propagazione delle vibrazioni nel terreno

#### La propagazione delle onde vibrazionali

##### L'attenuazione geometrica

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

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

dove:

- $d+d_0$ : distanza dall'asse della linea ferroviaria
- $d_0$ : distanza di riferimento
- $n=0,5$  per galleria,  $n=1$  per tracciato di superficie

|   |   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
|  | <b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b>  |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
| <b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b>                                   | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">COMMESSA</td> <td style="text-align: center;">LOTTO</td> <td style="text-align: center;">CODIFICA</td> <td style="text-align: center;">DOCUMENTO</td> <td style="text-align: center;">REV.</td> <td style="text-align: center;">FOGLIO</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">NP00</td> <td style="text-align: center;">00 D 22</td> <td style="text-align: center;">RG</td> <td style="text-align: center;">IM004002</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">25 di 31</td> </tr> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 25 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 25 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |

## La propagazione delle onde nei terreni sciolti

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.

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

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

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<br>[t/m <sup>3</sup> ] | Velocità di Propagazione<br>[m/s] | Fattore di Perdita<br>$\eta$ |
|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Roccia compatta             | 2.65                           | 3500                              | 0.01                         |
| Sabbia, limo, ghiaia, loess | 1.6                            | 600                               | 0.1                          |
| Argilla, terreni argillosi  | 1.7                            | 1500                              | 0.2÷0.5                      |

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

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

dove:

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

| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">COMMESSA</th> <th style="text-align: left;">LOTTO</th> <th style="text-align: left;">CODIFICA</th> <th style="text-align: left;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: left;">REV.</th> <th style="text-align: left;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NP00</td> <td>00 D 22</td> <td>RG</td> <td>IM004002</td> <td>A</td> <td>26 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 26 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 26 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |

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

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

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

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




dove:

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

### La determinazione della funzione di trasferimento

L'esecuzione di indagini in campo ha consentito una conoscenza di tipo puntuale e più precisa delle modalità di propagazione delle vibrazioni nel terreno indotte dal transito di convogli tranviaria lungo la linea tranviaria. In considerazione del contesto territoriale, geologico e infrastrutturale, per la costruzione del modello sperimentale sono stati utilizzati i dati rilevati dalle misure della campagna eseguita; si nota che, conoscendo la mutua distanza tra le postazioni, dai dati sperimentali è possibile estrapolare le funzioni di attenuazione che descrivono la propagazione nel terreno dell'onda vibrazionale in funzione della distanza. In considerazione dei terreni interessati dal tracciato di progetto, si è proceduto sia a valutazioni teoriche sulla propagazione, sia all'utilizzazione di una curva sperimentale di regressione per la trasmissione delle vibrazioni nel terreno con particolare riferimento al parametro  $V_{sor}$ .

Tale metodo risulta particolarmente più ottimale in quanto tiene conto sia delle condizioni geomorfologiche del sito di indagine sia della particolare tipologia di convogli tramviari NTL Translohr STE caratterizzati da una guida vincolata su gomma ad un unico binario centrale.

| <p>MANDATARIA</p>  <p>MANDANTE</p>  <p>MANDANTE</p>  <p>MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NP00</td> <td>00 D 22</td> <td>RG</td> <td>IM004002</td> <td>A</td> <td>27 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 27 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 27 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |

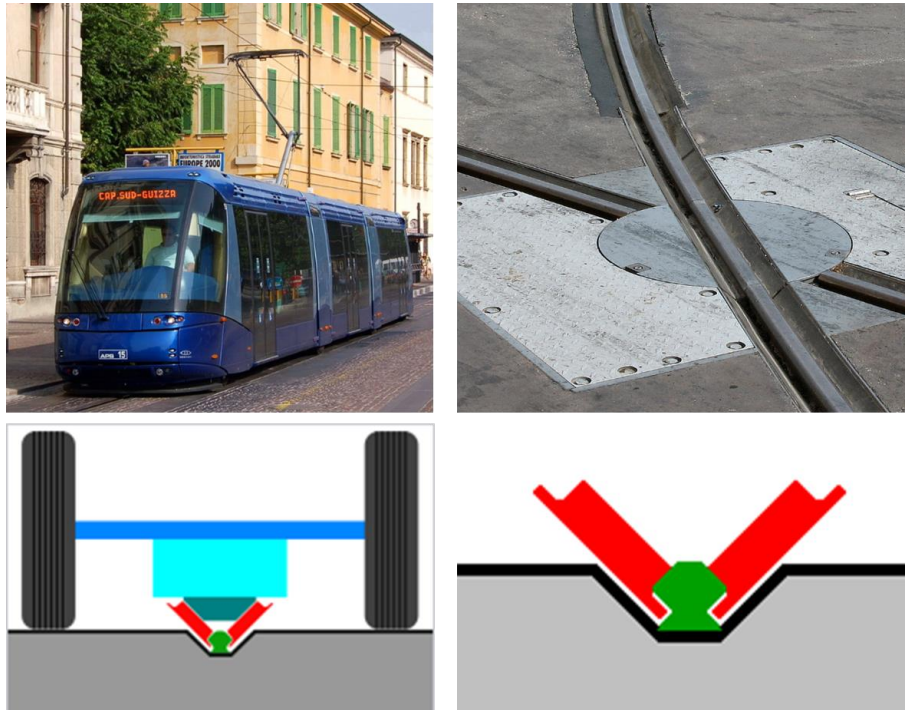



Figura 6-1 Caratteristiche dei convogli tramviari della NTL Translohr STE

A tal riguardo, sono stati considerati esclusivamente i valori rilevati sulle due terne T1 e T2 costituenti la sezione VIB-2 di misura in quanto per la sezione VIB-1 il valore residuo  $V_{res}$  risulta maggiore del valore di immissione  $V_{imm}$  e pertanto il parametro  $V_{sor}$  risulta trascurabile come riportato al paragrafo 9.3 della norma UNI9614:2017.

Sulla scorta quindi dei risultati ottenuti durante le indagini sul campo è possibile ritenere trascurabile l'interferenza vibrazionale sul territorio contermini della linea di progetto oggetto di studio limitatamente ai tratti costituiti da un singolo binario.

Dall'analisi dei rilievi eseguiti invece per la sezione di misura VIB-2, è stata determinata la funzione di trasferimento connessa alla propagazione delle vibrazioni nel sottosuolo rispetto al parametro  $V_{sor}$  indicato dalla norma UNI 9614:2017 quale riferimento per la valutazione del disturbo indotto dalle vibrazioni di origine ferroviaria. Tale analisi si riferisce esclusivamente alle tratte della linea in progetto caratterizzate in sezione da un doppio binario in affiancamento, potendo come detto prima sulla scorta dei dati monitorati poter considerare trascurabile l'impatto vibrazionale della linea nei tratti a singolo binario. In figura seguente si riporta la legge di decadimento con la distanza della  $V_{sor}$  sulla scorta dei dati sperimentali rilevati in corrispondenza del punto VIB-02 lungo il tratto a doppio binario. Per la terna T2 è stato considerato un valore  $V_{sor}$  nullo.

|   |  |         |          |           |      |          |
|---|--|---------|----------|-----------|------|----------|
|  | <b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b> |         |          |           |      |          |
| <b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b>                                   | COMMESSA   | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO   |
|   | NP00   | 00 D 22 | RG       | IM004002  | A    | 28 di 31 |

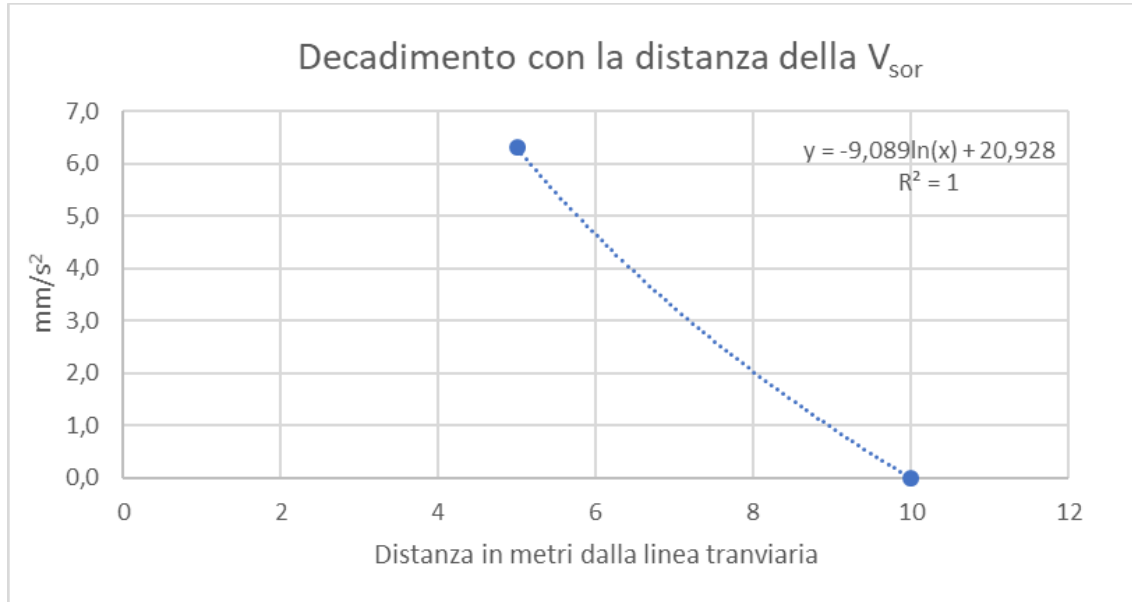


Figura 6-2 Curva di attenuazione della  $V_{sor}$  ricavata dai rilievi in corrispondenza delle terne T1 e T2 del punto VIB-02 poste rispettivamente a 5 m e 10 m dal binario




Considerate le medesime condizioni al contorno (geometria, piattaforma tramviaria, ambito urbano), tra linea SIR1 presso la quale sono stati effettuati i rilievi e Linea SIR3 in progetto, la legge di attenuazione della  $V_{sor}$ , determinata secondo le modalità indicate dalla UNI 9614:2017, sarà utilizzata nel successivo capitolo per la valutazione delle vibrazioni indotte in fase di esercizio e l'individuazione delle aree potenzialmente critiche.

## 7. LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO

### 7.1 Previsione dell'impatto in fase di esercizio

La norma UNI 9614, nella sua ultima versione 2017, introduce un differente criterio di valutazione del disturbo delle vibrazioni ferroviarie sui ricettori che si basa su valori di riferimento riferiti al valore massimo di accelerazione ponderata indotta da un singolo transito di un convoglio ferroviario a prescindere dal modello di esercizio della linea ferroviaria oggetto di studio e quindi dalla frequenza di accadimento del fenomeno durante l'arco temporale delle 24 ore.

Mediante la curva di ponderazione individuata nel paragrafo precedente attraverso i valori di accelerazione calcolati in corrispondenza dei punti di misura, sono state determinate le distanze dal piano del ferro alle quali si raggiungono i valori riferimento indicati dalla UNI 9614:2017 per la valutazione del disturbo delle vibrazioni.

| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">COMMESSA</th> <th style="text-align: left;">LOTTO</th> <th style="text-align: left;">CODIFICA</th> <th style="text-align: left;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: left;">REV.</th> <th style="text-align: left;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NP00</td> <td>00 D 22</td> <td>RG</td> <td>IM004002</td> <td>A</td> <td>29 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 29 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 29 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |




Ne conseguono pertanto le seguenti distanze limite, riferite all'asse del binario alla quota del piano campagna:

- Ambienti ad uso abitativo, periodo diurno (limite 7,2 mm/s<sup>2</sup>): 4,5 m
- Ambienti ad uso abitativo, periodo notturno (limite 3,6 mm/s<sup>2</sup>): 6,8 m
- Scuole ed Università (limite 5,4 mm/s<sup>2</sup>): 5,5 m
- Ospedale, limitatamente agli ambienti di degenza (limite 2,0 mm/s<sup>2</sup>): 8,0 m

L'analisi previsionale vibrazionale è stata condotta sulla scorta dei dati monitorati in corrispondenza di due sezioni dell'attuale linea tramviaria di Padova caratterizzate da una singola guida/binario e due guide/binari in affiancamento.

I dati rilevati dalla strumentazione posta in due punti a differente distanza dal singolo binario della linea mettono in evidenza come per le tratte a singolo binario le emissioni vibrazionali indotte dal transito di un convoglio possono essere ritenute nulle già ad una distanza di 7 m dal binario e quindi non costituenti alcun elemento di criticità per i ricettori contermini la linea in progetto.

Altresì per le tratte della linea con due guide/binari in affiancamento l'analisi previsionale tiene conto di un modello che si basa sui rilievi sperimentali nella sezione di misura VIB-02. Sulla scorta di tale modello sono state determinate le distanze alle quali vengono raggiunte i valori soglia indicati dalla norma UNI 9614:2017 per ciascuna tipologia di ricettore.

| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">COMMESSA</th> <th style="text-align: left;">LOTTO</th> <th style="text-align: left;">CODIFICA</th> <th style="text-align: left;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: left;">REV.</th> <th style="text-align: left;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NP00</td> <td>00 D 22</td> <td>RG</td> <td>IM004002</td> <td>A</td> <td>30 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 30 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 30 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |


## 7.2 Individuazione delle potenziali aree critiche

I valori soglia assunti per la valutazione del disturbo indotto dalle vibrazioni sui ricettori contermini la linea tramviaria di progetto sono quelli indicati dalla norma UNI 9614:2017 per ciascuna tipologia di ricettore in funzione del periodo temporale. Nel caso specifico i valori soglia presi a riferimento sono:

- Ricettore residenziale, limite diurno: 7,2 mm/s<sup>2</sup>;
- Ricettore residenziale, limite notturno: 3,6 mm/s<sup>2</sup>;
- Ricettore sensibile (ospedale), limite: 2,0 mm/s<sup>2</sup>;
- Ricettore sensibile (scuole), limite: 2,0 mm/s<sup>2</sup>;
- Ricettore sensibile (asili), limite: 3,6 mm/s<sup>2</sup>.

Determinate le distanze di riferimento dal binario sulla scorta dei suddetti valori soglia e del modello previsionale assunto, sono state verificate sul territorio le eventuali presenze dei ricettori all'interno delle fasce per le quali si stima un disturbo da vibrazioni secondo la destinazione d'uso del singolo edificio.

Sulla scorta dei risultati ottenuti e delle analisi territoriali si evince come per la linea tramviaria di progetto non sono presenti aree critiche, ovvero ricettori caratterizzati da livelli di immissione vibrazionale indotta dal transito di un convoglio tramviario superiori ai valori soglia indicati dalla norma UNI 9614:2017 per la valutazione del disturbo da vibrazioni.

| <p style="text-align: center;">MANDATARIA</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  <p style="text-align: center;">MANDANTE</p>  | <p><b>PROGETTAZIONE DEFINITIVA DELLA NUOVA LINEA TRAMVIARIA<br/>NELLA CITTÀ DI PADOVA SIR 3<br/>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>   |          |           |          |           |      |        |      |         |    |          |   |          |
|---|---|----------|-----------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|----------|---|----------|
| <p><b>Studio Vibrazionale – Relazione generale</b></p>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">COMMESSA</th> <th style="text-align: left;">LOTTO</th> <th style="text-align: left;">CODIFICA</th> <th style="text-align: left;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: left;">REV.</th> <th style="text-align: left;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NP00</td> <td>00 D 22</td> <td>RG</td> <td>IM004002</td> <td>A</td> <td>31 di 31</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO     | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | NP00 | 00 D 22 | RG | IM004002 | A | 31 di 31 |
| COMMESSA  | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO | REV.     | FOGLIO    |      |        |      |         |    |          |   |          |
| NP00  | 00 D 22   | RG       | IM004002  | A        | 31 di 31  |      |        |      |         |    |          |   |          |

## 8. CONCLUSIONI

Il livello di esposizione alle vibrazioni dei ricettori lungo la tratta oggetto di studio è stato analizzato mediante un modello di calcolo calibrato sul territorio sulla base degli esiti delle misure condotte sull'attuale linea tranviaria di Padova SIR1.

- Sezione 1 (VIB-1): in prossimità del civico 51 in via Santa Maria Assunta lungo la linea SIR1 laddove la linea si sviluppa su un singolo binario.
- Sezione 2 (VIB-2): in corrispondenza dell'incrocio tra via Guizza Conselvana e via I. Svevo lungo la linea SIR1 laddove la linea si sviluppa su due binari in affiancamento.

Le misure sono state eseguite su due sezioni differenti, denominate VIB-1 e VIB-2, poste lungo l'attuale linea SIR1, laddove la linea si sviluppa su un singolo binario, nel primo caso, e su due binari in affiancamento, nel secondo caso. Ciascuna sezione è caratterizzata da due punti di monitoraggio denominati T1 e T2.

La metodologia di misura e di analisi del disturbo sugli edifici si riferisce a quella specificata dalla norma UNI 9614:2017, ovvero attraverso il rilievo delle accelerazioni lungo gli assi x, y e z e la determinazione delle accelerazioni immesse dalla sorgente ferroviaria e delle altre sorgenti in termini di accelerazione ponderata massima statistica.

Sulla scorta dei dati rilevati mediante due accelerometri posti a differenti distanze è stata calcolata la funzione di trasferimento rappresentativa delle modalità di propagazione delle vibrazioni indotte dal transito dei convogli tramviari, oltre che i valori di accelerazione connessi secondo le modalità indicate dalla norma UNI 9614:2017.

Sono state quindi individuate le distanze alle quali vengono raggiunti i valori di riferimento indicati dalla norma UNI 9614:2017 per i ricettori in funzione della loro destinazione d'uso.

Per le tratte a singolo binario le vibrazioni indotte dalla sorgente tramviaria risultano nulle già ad una distanza di 7 m dall'asse del binario e quindi i relativi impatti vibrazionali nulli.

Per le tratte caratterizzate da doppio binario in affiancamento i principali valori di riferimento limite più critici (residenziale notturno e ospedale diurno) vengono raggiunte previsionalmente ad una distanza di 6,8 e 8 m dall'asse della linea tramviaria.

Considerando quindi tali distanze come rappresentative delle condizioni limite per la valutazione del disturbo sugli edifici indotto dal traffico tramviario, non si evincono condizioni di potenziale criticità per la tratta della linea in progetto.