

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N. 443/01e s.m.i.



Progetto cofinanziato
dalla Unione Europea

CUP: J94F04000020001

U.O. AMBIENTE, ARCHITETTURA E ARCHEOLOGIA

PROGETTO DEFINITIVO

ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA

ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA

LOTTO 1: FORTEZZA - PONTE GARDENA

STUDIO VIBRAZIONI

RELAZIONE GENERALE

SCALA:

-

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

IBL1 10 D 22 RG IM0006 002 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione definitiva per CdS	A. CORVAJA	APR. 2013	S. RELANDINI	APR. 2013	C. Mezzocchi	APR. 2013	A. CAVALINO

File: IBL1 10 D 22 RG IM0006 002 A

n. Elab.

ITALFERR S.p.A.
Ing. Arch. Antonello Martino
Ordine Architetti di Roma
n. 10485

INDICE

1.0	PREMESSA	4
2.0	RIFERIMENTI NORMATIVI.....	6
2.1	NORMA UNI 9614.....	8
2.2	NORMA UNI 9916.....	10
2.3	IL CRITERIO U.S.A. PER L'IMPATTO DA VIBRAZIONI E RUMORE DEI TRASPORTI.....	14
2.4	CRITERI DI VALUTAZIONE PER IL RUMORE RE-IRRADIATO	15
2.5	LIMITI APPLICABILI NELL'AMBITO DEL PRESENTE STUDIO	18
3.0	CARATTERIZZAZIONE TERRITORIALE.....	19
3.1	DESCRIZIONE DELL'AREA DI STUDIO.....	19
3.2	RILIEVI DI VIBRAZIONI IN SITU.....	20
3.3	STRUMENTAZIONE E METODOLOGIA UTILIZZATA	22
3.4	ANALISI DEI RILIEVI	23
3.4.1	<i>Entità vibrazionale e relativa variabilità dei transiti ferroviari</i>	<i>23</i>
3.4.2	<i>Caratteristiche di emissione delle vibrazioni di origine ferroviaria.....</i>	<i>24</i>
4.0	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	26
5.0	STUDIO DELL'IMPATTO DA VIBRAZIONI	28
5.1	CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE DI VIBRAZIONI	31
5.1.1	<i>Interazione ruota-rotaia.....</i>	<i>31</i>
5.1.2	<i>Velocità dei treno.....</i>	<i>32</i>
5.2	LA PROPAGAZIONE DEL FENOMENO VIBRATORIO NEL TERRENO.....	33
5.2.1	<i>Metodo di Kim e Lee</i>	<i>33</i>
5.2.2	<i>Metodo Pezzoli.....</i>	<i>34</i>
5.2.3	<i>Incertezza di calcolo</i>	<i>36</i>
5.3	CARATTERIZZAZIONE DEGLI EDIFICI.....	36

RELAZIONE GENERALE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IBL1	10	D22RG	IM 00 06 002	A	3 di 48

5.3.1	<i>Risposta degli edifici alle vibrazioni</i>	36
5.3.2	<i>La propagazione delle vibrazioni negli edifici</i>	38
5.3.3	<i>Accoppiamento terreno – fondazioni edificio</i>	39
5.3.4	<i>Trasmissione attraverso l'edificio</i>	40
5.3.5	<i>Risonanze strutturali dei solai</i>	41
5.3.6	<i>Individuazione delle vibrazioni trasmesse a ciascun edificio e stima della risposta</i>	42
5.3.7	<i>La stima del rumore re-irradiato</i>	44
6.0	INDICAZIONI PROGETTUALI PER GLI INTERVENTI DI ISOLAMENTO ALLE VIBRAZIONI	47
6.1	CONSIDERAZIONI PROGETTUALI.....	47
6.2	INDIVIDUAZIONE DELLE TRATTE CRITICHE.....	48
7.0	CONCLUSIONI.....	48

1.0 PREMESSA

La costruzione e l'esercizio di una linea ferroviaria sono fonte di sollecitazioni dinamiche nel terreno circostante caratterizzate da una modesta fascia di influenza, in genere inferiore ai 50 m. 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 dal Quadruplicamento della Linea Fortezza – Verona relativo al Lotto 1 Fortezza – Ponte Gardena, nello specifico lo studio acustico si sviluppa sui seguenti tratti di linea:

- dallo sbocco della galleria naturale Sciliar al km 171+490 fino al km 173+400 circa (pk riferite alla linea Storica) e le interconnessioni di nuova realizzazione fino agli imbocchi in galleria
- viadotti sul fiume Isarco, dal km 15+860 al km 16+150 circa (pk riferite alle interconnessioni)

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 nazionale e internazionale.
- Caratterizzazione ante operam. Individuazione dei potenziali ricettori sensibili. Mediante sopralluoghi mirati ed analisi comparata dei dati riportati dalle cartografie aerofotogrammetriche è stato effettuato un vero e proprio censimento dei ricettori (verifica della posizione, della destinazione d'uso, dell'altezza nonché dello stato di tutti i ricettori potenzialmente impattati).
- Rilevamento delle vibrazioni. Le indagini sperimentali sono state finalizzate, non solo alla valutazione dell'entità del livello vibrazionale allo stato attuale, ma anche alla costruzione di un modello sperimentale in relazione alla propagazione nel terreno e al comportamento degli edifici.

- *Individuazione delle aree critiche.* In questa parte dello studio sono state individuate le aree dove vi sono da attendersi dei superamenti dei valori di riferimento. I risultati di questa fase sono riportati nelle *Planimetrie localizzazione degli interventi di mitigazione acustica e delle aree critiche per le vibrazioni 4 Tav.*

	QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 1: FORTEZZA – PONTE GARDENA					
	RELAZIONE GENERALE	COMMESSA IBL1	LOTTO 10	CODIFICA D22RG	DOCUMENTO IM 00 06 002	REV. A

2.0 RIFERIMENTI NORMATIVI

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

- Norma UNI 9614:1990 “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo”
- Norma UNI 9916:2004 “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici”

Nella UNI 9614:1990, attualmente in revisione, viene definito il metodo di misura delle vibrazioni di livello costante immesse negli edifici ad opera di sorgenti esterne o interne agli edifici stessi. La norma concorda parzialmente con la norma internazionale ISO 2631/2.

La norma UNI 9916, attualmente in fase di revisione, 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 la valutazioni dell'impatto da **vibrazioni in ambito ferroviario**, fra cui:

- **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 bygnader
- **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 støy – 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.

2.1 Norma UNI 9614

La UNI 9614 “Vibrazioni - Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo” considera i diversi tipi di sollecitazione vibratoria: livelli costanti, non costanti, impulsivi.

La norma definisce metodologia di misura e analisi del segnale al fine di quantificare il disturbo da vibrazioni verso le persone. La vibrazione viene espressa attraverso il concetto di accelerazione

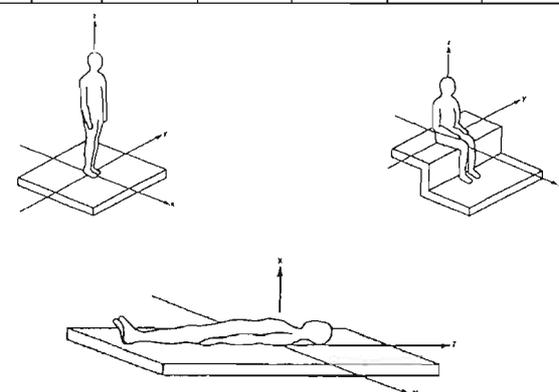
$$a = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a(t)^2 dt}$$

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

$$L = 20 \log\left(\frac{a}{a_0}\right) \quad a_0 = 10^{-6} \frac{m}{s^2}$$

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

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



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

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

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

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

L'appendice A.4 della norma UNI 9614 recita:

Nel caso di vibrazioni da veicoli ferroviari e immerse nelle abitazioni, i risultati di alcune sperimentazioni indicano come riferimento i valori 30 mm/s² (asse z) e 21,6 mm/s² (assi x e y). Nel presente lavoro non si farà riferimento a tale appendice A.4 in quanto ritenuta non sufficientemente cautelativa.

La UNI 9614 definisce tre tipologie di segnali vibratorii:

- Vibrazioni di livello costante
- Vibrazioni di livello non costante
- Vibrazioni impulsive

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

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

Per quanto riguarda la valutazione delle vibrazioni nel presente lavoro si è scelto di eseguire le valutazioni sul valore medio del valore efficace (RMS) della vibrazione su un intervallo equivalente alla durata dell'evento di transito ferroviario.

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

Direzione	Soglia di percezione La_w	Limite di accettabilità per abitazioni La_w
Asse Z	74	77
Assi X-Y	71	74

Direzione	Limite di accettabilità per uffici La_w
Asse Z	86
Assi X-Y	83

2.2 Norma UNI 9916

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 ed 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 quello 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 come intervallo di frequenze di interesse quello compreso tra 1 e 150 Hz. Tale intervallo interessa una grande casistica di edifici e di elementi strutturali di edifici sottoposti ad eccitazione naturale (venti, terremoti ecc.) nonché ad eccitazioni causate dall'uomo (traffico, attività di costruzione, ecc.). In alcuni casi l'intervallo di frequenza significativo delle vibrazioni può essere più ampio ma 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 norma UNI 9926 contiene una guida semplificata per la classificazione degli edifici, secondo la loro probabile reazione alle vibrazioni meccaniche trasmesse attraverso il terreno. Le strutture comprese in tale classificazione riguardano:

- Tutti gli edifici residenziali e gli edifici utilizzati per le attività professionali (case, uffici, ospedali, case di cura ecc.).
- Edifici pubblici (municipi, chiese ecc.)

- Strutture industriali più leggere spesso concepite secondo le modalità costruttive in uso per gli edifici di abitazione.

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 il comportamento di una struttura sollecitata da 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 o antichi e strutture costruite con criteri tradizionali (Gruppo 1)
- Edifici e strutture moderne (Gruppo 2)

CATEGORIE DI EDIFICI

1° GRUPPO	2° GRUPPO
Costruzioni industriali pesanti da cinque a sette piani di tipo resistenti ai terremoti. Strutture pesanti compresi ponti fortezze bastioni	Costruzioni industriali ad ossatura pesante di due o tre piani costruiti in armato oppure a struttura metallica con rivestimento di fogli o pannelli di tamponamento costruiti di pietre, mattoni o di elementi prefabbricati e di acciaio, solai in acciaio o calcestruzzo armato prefabbricato o gettato in opera Costruzioni industriali pesanti in acciaio o in calcestruzzo armato con struttura composita
Edifici pubblici ad ossatura in legno di tipo resistente ai terremoti	Immobili da 5 a 9 piani e più, uffici, ospedali, costruzioni industriali ad ossatura leggera in calcestruzzo armato od a struttura in acciaio con pannelli di tamponamenti in pietre, mattoni o elementi pref. non concepiti per terremoti
Case di 1 o 2 piani ad ossatura in legno e costruzioni di uso similare con tamponamenti e/o rivestimenti, comprese le capanne di tipo resistente ai terremoti	Costruzioni industriali abbastanza leggere di tipo aperto ad un solo piano, giunti per tramezzi, ossatura in acciaio, alluminio, in legno o in calcestruzzo con rivestimento in legno leggero e tamponamenti in pannelli leggeri di tipo resistente ai terremoti
Costruzioni a più piani abbastanza pesanti utilizzate come magazzini di media importanza o come abitazioni da 5 a 7 piani o più	Abitazioni a 2 piani e costruzioni di utilizzo similare in pietra, mattoni o elementi prefabbricati comportanti un solaio ed un tetto rinforzati o interamente costruito in calcestruzzo armato o materiali simili resistente ai terremoti
Case da 4 a 6 piani ed edifici di utilizzo urbano, costruiti in pietre o mattoni, con muri portanti di costruzione più pesante, comprese le case padronali e le residenze del tipo "piccolo castello"	Edifici e simili da 4 a 10 piani principalmente costruiti in pietre leggere e mattoni, legati in gran parte con muri interni di materiali simili e da solai in calcestruzzo armato prefab. o gettato in opera almeno a ciascun piano
Case a 2 piani ed edifici di utilizzo similare costruiti in pietre in mattoni ed in argilla, con solette e copertura in legno Parti costruite in pietra o mattoni, di tipo resistente ai terremoti	Case di abitazione ed edifici di utilizzo similare a 2 piani, compresi uffici costruiti con muri di pietra, in mattoni, in elementi prefab. e con strutture di soletta e di copertura in legno o prefabbricate

	QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 1: FORTEZZA – PONTE GARDENA					
	RELAZIONE GENERALE	COMMESSA IBL1	LOTTO 10	CODIFICA D22RG	DOCUMENTO IM 00 06 002	REV. A
	Chiese di grande altezza, saloni e strutture simili in pietra o in mattoni con arcate, comprese le chiese di minor importanza con arcate e costruzioni simili. Chiese basse ad ossatura pesante di tipo "aperto" (non controventate) e rimesse, comprese stalle, garages, costruzioni simili con solette e coperture in legno molto pesanti	Case e costruzioni simili ad uno o 2 piani, costruzioni più leggere e realizzate con materiali leggere e realizzate con materiali leggeri prefab. o preparati in opera				
	Rovine ed altre costruzioni in cattivo stato tutte le costruzioni della categoria 7 aventi un valore storico					

L'associazione della categoria viene fatta risalire alle caratteristiche tipologiche e costruttive della costruzione ed al numero di piani.

Le categorie riportate in tabella si riferiscono, in tutte e due i casi, a fabbricati con strutture in buono stato di manutenzione, senza difetti di costruzione, e che non hanno subito danni legati a fenomeni sismici, etc.. In caso diverso, gli edifici devono essere classificati in una categoria inferiore a quella propria.

Le fondazioni sono classificate in tre classi:

- ◆ classe A: pali legati in cemento armato; platea rigida; pali di legno legati tra loro; muri di sostegno a gravità;
- ◆ classe B: pali non legati in cemento armato; fondazioni di muri; pali e platee in legno;
- ◆ classe C: muri di sostegno leggeri; fondazioni importanti in pietre; assenza di fondazioni; muri direttamente sul terreno.

Il terreno viene classificato in sei classi:

- ◆ tipo A: rocce non fessurate; rocce molto solide leggermente fessurate; sabbie cementate;
- ◆ tipo B: terreni compattati, compressi in culle orizzontali;
- ◆ tipo C: terreni poco compattati, compressi in culle orizzontali;
- ◆ tipo D: piani inclinati, con superfici di scorrimento potenziali;
- ◆ tipo E: terreni granulari, sabbie, ghiaie senza coesione, argille con coesione sature d'acqua;
- ◆ tipo F: materiali di riporto.

Il grado di resistenza dei terreni sopra elencati decresce da A a F.

Il grado di attenuazione delle onde vibratorie è infatti strettamente legato alle caratteristiche del materiale ed in particolare alle sue proprietà elastiche. Maggiore è l'elasticità del mezzo minore sarà l'attenuazione.

L'appendice B della UNI 9916 contiene i criteri di accettabilità dei livelli di vibrazione con riferimento alla Normativa Tedesca DIN 4150 ed al Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 24 gennaio 1986 "Norme tecniche relative alle costruzioni in zona sismica", riassunti nella seguente tabella.

Velocità massime ammissibili di picco (UNI9916)

Cat.	Tipi di strutture	Velocità di vibrazione in mm/s			
		Misura alla fondazione			Misura al pavimento dell'ultimo piano
		<10 Hz	10÷50 Hz	50÷100 Hz	Frequenze diverse
1	Edifici commerciali, edifici industriali e simili	20	20÷40	40÷50	40
2	Edifici residenziali e simili	5	5÷15	15÷20	15
3	Strutture particolarmente sensibili alle vibrazioni non rientranti nelle categorie precedenti e di grande valore intrinseco	3	3÷8	8÷10	8

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

La norma citata prevede che le misurazioni siano effettuate secondo tre assi mutuamente ortogonali: un asse ha direzione verticale, le due componenti orizzontali sono preferibilmente parallele/ortogonali ai muri dell'edificio. Le misurazioni possono essere effettuate anche con accelerometri mono o biassiali, purchè in numero di tre, mutualmente ortogonali, e montanti su struttura rigida che garantisca che le misurazioni si riferiscano ad un unico punto

La norma specifica che i valori di riferimento indicati riguardano solo l'effetto diretto delle vibrazioni.

Non sono contemplati gli effetti indiretti quali, per esempio, cedimenti provocati dalla compattazione del terreno a seguito delle vibrazioni. Tali effetti indiretti devono essere considerati a parte.

I valori di riferimento indicati sono quelli al di sotto dei quali, salvo casi particolari, è ragionevole presumere che non vi sia danno; si specifica inoltre che il superamento dei limiti indicati non implica necessariamente il verificarsi del danno, ma è un segnale della necessità di indagini più approfondite.

Si evidenzia infine l'esistenza di pochi o anche di un solo punto in cui si verifica superamento dei limiti, può essere sintomo di situazione suscettibile di causare danno cosmetico.

La DIN 4150-3 considera tre classi di edifici:

- 1) edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili;
- 2) edifici residenziali e costruzioni simili;
- 3) costruzioni che non appartengono alle prime due categorie e sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici).

La DIN 4150-3 considera due tipologie di vibrazione:

- vibrazione di breve durata
- vibrazione permanente

La norma prevede la misurazione ed il controllo del livello di vibrazione sia in fondazione (per tutte e tre le componenti) che ai piani superiori, con particolare riferimento al piano più elevato per quanto riguarda le componenti orizzontali della velocità. Tali misurazioni forniscono un quadro della risposta globale dell'edificio; sono inoltre necessarie misurazioni relative alla risposta dei solai ai singoli piani, che possono essere limitate alla misurazione della componente verticale della velocità, registrata al centro del solaio.

La Parte III della DIN 4150 indica le velocità massime ammissibili per vibrazioni transitorie quali quelle generate da transiti ferroviari:

- Per l'edificio nel suo complesso vedere la tabella precedente.
- Sui pavimenti $v < 20$ mm/s in direzione verticale nel punto di massima vibrazione.

Per vibrazioni stazionare (o nel caso che il numero di eventi, o transiti, giornaliero sia superiore a 60-70):

- Sull'edificio nel suo complesso $v < 5$ mm/s in direzione orizzontale in corrispondenza dell'ultimo piano.
- Sui pavimenti: $v < 10$ mm/s in direzione verticale nel punto di massima vibrazione.

2.3 Il criterio U.S.A. per l'impatto da vibrazioni e rumore dei trasporti

Il criterio utilizzato negli U.S.A. per la valutazione dell'impatto ambientale delle vibrazioni ferroviarie è descritto nel documento predisposto dalla Harris Miller Miller & Hanson Inc. di Burlington – MA, nel 199 "Report FTA-VA-90-1003-06 *Transit Noise and Vibration Impact Assessment* (Office of Planning and Environment Federal Transit Administration – USA)".

Questo documento indica come criterio per la valutazione dell'impatto da vibrazioni tre diversi approcci con grado di dettaglio diverso in funzione del grado di approfondimento progettuale. In particolare, vengono indicati i seguenti approcci.

<i>Critério</i>	<i>Finalità</i>	<i>Metodologia</i>
Vibration Screening Procedure	Approccio utilizzato per progettazione preliminare	La vibrazione immessa nell'ambiente circostante da una infrastruttura dei trasporti è valutata in base al tipo di infrastruttura e alla distanza. Si utilizza una tabella che indica le distanze entro cui individuare eventuali ricettori potenzialmente impattati.
General Vibration Assessment	Approccio utilizzato per progettazione definitiva	La vibrazione immessa nell'ambiente circostante da una infrastruttura dei trasporti è valutata in base al tipo di infrastruttura e alla distanza. Si valuta l'immissione a distanza sulla base di un abaco e di fattori correttivi che tengono conto della velocità e tipologia dei veicoli ferroviari.
Detailed Vibration Analysis	Approccio utilizzato per progettazione esecutiva	La vibrazione immessa nell'ambiente circostante da una infrastruttura dei trasporti è valutata sperimentalmente tramite la misura in campo della funzione di trasferimento fra la sede ferroviaria e i potenziali ricettori.

I limiti applicabili sono definiti in base alla velocità di vibrazione (non ponderata) generata dal transito ferroviario. Si tiene conto anche del rumore re-irradiato.

Il criterio del documento U.S.A. è molto interessante in quanto di semplice applicazione, ma è particolarmente difficile poter confrontare i valori con quelli della normativa nazionale UNI a motivo della scelta diversa sul tipo di parametro da utilizzare e sull'approccio completamente diverso.

2.4 Criteri di valutazione per il rumore re-irradiato

I limiti per il rumore (e dunque anche per il rumore re-irradiato dovuto al transito ferroviario) sono definiti in Italia dal d.P.R. 459/1998. Tali limiti sono tuttavia validi ed applicabili al contesto del rumore prodotto per via aerea, e sono comunque di entità tale da essere ben difficilmente riscontrabili nel caso di rumore trasmesso dalle infrastrutture ferroviarie sotto forma di vibrazione e successivamente re-irradiato dalle pareti degli edifici.

Tale particolare tipologia di disturbo, percepibile solo all'interno degli edifici, viene solitamente associato a sensazioni di disagio e insicurezza per la stabilità dell'edificio, e dunque la sensibilità delle persone a questo fenomeno è enormemente diversa da quella che si registra solitamente per il rumore propagantesi per via aerea. Ne consegue che essi non sono generalmente sufficienti a garantire un comfort adeguato nel caso del rumore re-irradiato.

In particolare, occorre sottolineare come il criterio di valutazione proposto dal d.P.R. 459/98 valuti l'immissione di tutti i transiti ferroviari diurni e notturni, e poi ne distribuisce l'impatto sull'intero periodo. E' invece dimostrato come la percezione del disturbo dovuto al rumore re-irradiato, come peraltro avviene nel caso della vibrazione, debba essere riferito alla sola durata dell'evento, e dunque assume ben altri valori.

In alcuni casi particolari (sale da concerto, sale di registrazione, studi televisivi, auditorium, cinema, teatri...) il rumore re-irradiato può compromettere seriamente la fruizione degli ambienti, progettati per ottenere un ridotto rumore di fondo: le vibrazioni propagantesi nel terreno e successivamente convertite in rumore possono dunque compromettere i criteri progettuali, che di solito si rivolgono unicamente a garantire un isolamento al rumore propagato per via aerea.

Le seguenti tabelle estratte dal documento della Federal Transit Administration – USA (2006) forniscono utili indicazioni sui livelli massimi ammissibili.

Tipologia ricettore	Eventi frequenti*	Eventi occasionali*	Eventi non frequenti*
	dB(A)	dB(A)	dB(A)
Edifici residenziali con permanenza notturna	35	38	43
Edifici senza permanenza notturna	40	43	48

*Si definiscono

- eventi frequenti quando vi sono più di 70 transiti/giorno;
- eventi occasionali quando vi sono fra 30 e 70 eventi/giorno;
- eventi infrequenti quando vi sono meno di 30 eventi/giorno

Un ulteriore riferimento di validità internazionale è costituito dai limiti proposti dall'APTA (American Association for Public Transport), riportati di seguito.

Categoria ricettore	<i>Limite applicato** per la definizione del rumore re-irradiato indotto da vibrazioni immesse in un edificio [UNI 9614:1990]</i> [dBA re 20 x10 ⁻⁵ Pa]		
Categoria 1 – edifici contenenti apparecchiature sensibili alle vibrazioni	n.a.*		
Categoria 2 – abitazioni residenziali	Abitazioni singole	Abitazioni multifamiliari	Hotel/Motel
Aree a bassa densità popolazione	30	35	40
Aree media densità popolazione	35	40	45
Aree elevata densità popolazione	35	40	45
Aree commerciali	40	45	50
Aree industriali	40	45	50
Categoria 3 – edifici pubblici e uffici, università, aule giudiziarie	35		
Scuole e biblioteche	40		
Chiese	35		
Categoria 4 – edifici senza particolari esigenze di quiete	n.a.		
Categoria 5 – edifici con particolari esigenze di quiete.			
5-1: sale da concerto e sale di registrazione	16 - 25		
5-2: auditorium, cinema	30		
5-3: teatri	35		

RELAZIONE GENERALE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IBL1	10	D22RG	IM 00 06 002	A	17 di 48

<i>Caratteristiche urbanistiche dell'area</i>	<i>Abitazioni monofamiliari</i>	<i>Abitazioni multifamiliari</i>	<i>Hotel/Motel</i>
Area a bassa densità di popolazione	30 dBA	35 dBA	40 dBA
Area con densità media di popolazione	35 dBA	40 dBA	45 dBA
Area ad elevata densità di popolazione	35 dBA	40 dBA	45 dBA
Area commerciale	40 dBA	45 dBA	50 dBA
Area industriale/in prossimità strade di grande comunicazione	40 dBA	45 dBA	50 dBA

<i>Tipo di edificio o stanza</i>	<i>Livello massimo di rumore re-irradiato associato al singolo evento</i>
Sala da concerto	16 dBA
Sala di registrazione radio/TV	25 dBA
Musei, auditoria, sale musicali	30 dBA
Chiese e teatri	35 dBA
Sale operatorie e sale di riposo	35 dBA
Tribunali e edifici istituzionali	35 dBA
Scuole e biblioteche	40 dBA
Edifici universitari	35 dBA
Uffici	35 dBA
Edifici commerciali	45 dBA

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 1: FORTEZZA – PONTE GARDENA					
	RELAZIONE GENERALE	COMMESSA IBL1	LOTTO 10	CODIFICA D22RG	DOCUMENTO IM 00 06 002	REV. A

2.5 Limiti applicabili nell'ambito del presente studio

Ai fini del presente studio di impatto le immissioni di vibrazioni presso i potenziali ricettori verranno valutate secondo il seguente criterio:

Tipologia immissione	Criterio di valutazione / norma di riferimento	Parametro di valutazione	Limiti applicabili
Vibrazioni da esercizio linea ferroviaria – disturbo alle persone	UNI 9614:1990	L_{aw} (in dB re 10^{-6} m/s ²)	Abitazioni: $L_{aw} = 74$ dB (soglia di percezione asse verticale) $L_{aw} = 77$ dB (asse verticale) Uffici e simili: $L_{aw} = 83$ dB (asse verticale)
Vibrazioni da esercizio linea ferroviaria – danno agli edifici	UNI 9916:2004	Velocità di picco (Peak Particle Velocity) In mm/s	$V < 5$ mm/s in direzione orizzontale in corrispondenza dell'ultimo piano Sui pavimenti: $v < 10$ mm/s in direzione verticale nel punto di massima vibrazione
Rumore re-irradiato	FTA-VA-90-1003-06 <i>Transit Noise and Vibration Impact Assessment</i>	Soglia di percezione rilevata come <u>valor medio sulla durata del transito ferroviario</u>	Edifici residenziali: 35 dBA Edifici non residenziali (uffici, luoghi di culto...): 40 dBA Edifici industriali: non si applica limite

La rappresentazione dei superamenti per le vibrazioni presso i ricettori individuati avviene secondo una scala a passi di 3 dB.

Nel caso di superamenti dovuti al rumore re-irradiato i superamenti vengono indicati bordando in colore azzurro gli edifici individuati.

	QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 1: FORTEZZA – PONTE GARDENA					
	RELAZIONE GENERALE	COMMESSA IBL1	LOTTO 10	CODIFICA D22RG	DOCUMENTO IM 00 06 002	REV. A

3.0 CARATTERIZZAZIONE TERRITORIALE

Allo scopo di individuare i ricettori potenzialmente sensibili è stata eseguita una dettagliata analisi territoriale che ha permesso di individuare quantitativamente e qualitativamente i ricettori potenzialmente influenzati dalle vibrazioni ferroviarie.

3.1 Descrizione dell'area di studio

Nella seguente figura sono rappresentate le aree geografiche in cui si localizzano le zone oggetto di studio.



Vista aerea dell'inquadramento generale delle zone oggetto di studio

	QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 1: FORTEZZA – PONTE GARDENA					
	RELAZIONE GENERALE	COMMESSA IBL1	LOTTO 10	CODIFICA D22RG	DOCUMENTO IM 00 06 002	REV. A

I ricettori interessati sono prevalentemente residenziali e multipiano, di solito tra i due ed i quattro piani di altezza. Nell'ambito della presente attività è stato effettuato un dettagliato censimento dei ricettori, cui si fa riferimento per le informazioni riguardanti anche gli aspetti vibrazionali. I risultati di detto censimento sono stati riportati, su una base cartografica e su apposite schede complete di informazioni riguardanti la localizzazione, lo stato e la consistenza e la relativa documentazione fotografica. I ricettori potenzialmente influenzati sono stati censiti singolarmente con schede riportate in appositi allegati.

3.2 Rilievi di vibrazioni in situ

I rilievi sono finalizzati alla caratterizzazione dell'impatto vibrazionale determinato dal transito dei convogli ferroviari nelle immediate vicinanze del tracciato nell'area oggetto di risanamento acustico in corrispondenza delle progressive chilometriche indicativamente comprese tra la pk 171+900 e 172+400.

Le indagini sono state svolte presso un edificio a destinazione d'uso scolastica alla pk 171+880 circa (Sezione 1) e nell'area a parcheggio in prossimità della stazione di Ponte Gardena alla pk 172+340 (Sezione 2). In quest'ultimo caso, non essendo presenti edifici sufficientemente vicini al tracciato ferroviario i rilievi sono stati svolti in corrispondenza delle aiuole presenti nell'ambito del parcheggio oltre che nelle immediate vicinanze del binario.

La sezione 1 comprende l'effettuazioni di rilievi in n. 4 postazioni di misura così come di seguito descritte:

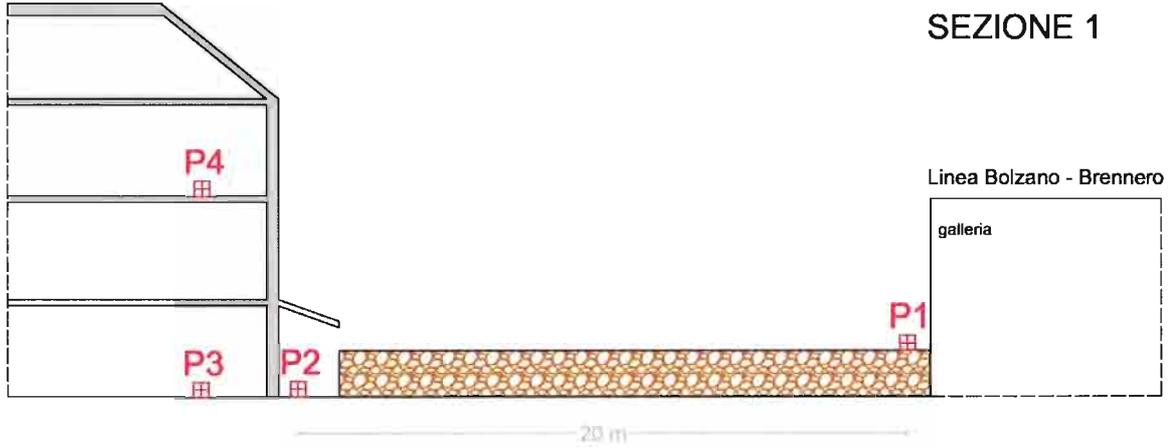
Postazione P1: localizzata presso la linea ferroviaria, ad una distanza di circa 4,50 m dall'asse del binario di corsa. L'accelerometro è stato fissato sulla base di una massa cubica in acciaio poggiata sul terreno, immediatamente al di fuori della paratia della galleria artificiale. I rilievi in tale postazione sono rappresentativi della caratterizzazione degli spettri di emissione dei convoglio in prossimità della linea.

Postazione P2: localizzata all'esterno dell'edificio ad 1 metro dal filo del fabbricato. L'accelerometro è stato fissato su una massa in acciaio poggiata sul terreno. I rilievi servono per caratterizzare la funzione di trasferimento del terreno nonché come riferimento per la determinazione dell'attenuazione all'interfaccia delle fondazioni.

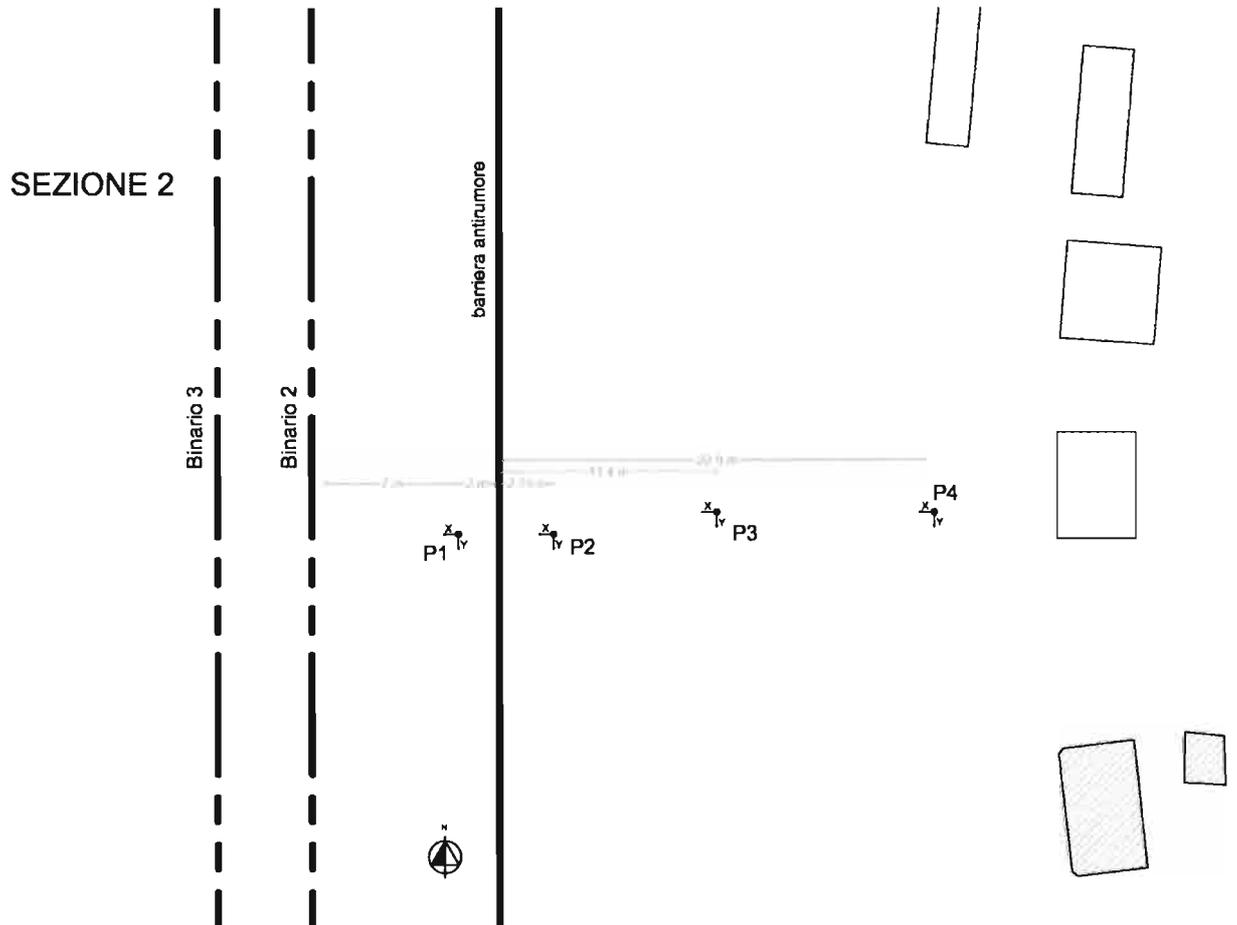
Postazione P3: localizzata presso le fondazioni dell'edificio, al primo solaio (piano terra). L'accelerometro è stato fissato su una massa in acciaio poggiata sul pavimento. I rilievi servono per la determinazione dell'attenuazione all'interfaccia fondazioni/terreno.

Postazione P4: localizzata all'interno dell'edificio, all'ultimo solaio. L'accelerometro è stato fissato su una massa in acciaio poggiata sul pavimento. I rilievi servono per caratterizzare l'amplificazione delle vibrazioni dovute alla presenza del solaio nonché determinare l'andamento delle stesse al variare dei piani.

La figura di seguito riportata riportano uno schema di localizzazione dei punti di misura:



La sezione di misura S2, invece, è stata collocata, non essendo presenti edifici sufficientemente vicini al tracciato, in corrispondenza delle aiuole presenti all'interno del parcheggio della stazione di Ponte Gardena, oltre che nelle immediate vicinanze dell'asse ferroviario.



	QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 1: FORTEZZA – PONTE GARDENA					
	RELAZIONE GENERALE	COMMESSA IBL1	LOTTO 10	CODIFICA D22RG	DOCUMENTO IM 00 06 002	REV. A

3.3 Strumentazione e metodologia utilizzata

Per l'esecuzione dei rilievi sono state utilizzate due tipologie di sistemi acquisizione dati:

- Sistemi Tablet PC con scheda di acquisizione dati in allestimento fisso con allacciamento alla rete elettrica. La strumentazione installata è composta da:
 - Tablet PC Hewlett-Packard Compaq tc4200.
 - Scheda di acquisizione dati National Instruments NI-9233 a 4 canali.
 - Terna accelerometrica costituita da 3 accelerometri monoassiali Wilcoxon Research – Low Frequency Accelerometer 799LF - Sensibilità 500 mV/g - Accelerazione di picco 10 g
 - Massetto metallico per il fissaggio degli accelerometri.
- Analizzatori multicanale Sinus Soundbook composti da:
 - Sistema di acquisizione e analisi dati a 4 canali con software di gestione Samurai.
 - PC Portatile Panasonic Toughbook CF-19
 - Una terna accelerometrica costituita da 3 accelerometri monoassiali Dytran Instruments modello 3055A4 - Sensibilità 500 mV/g Accelerazione di picco 10 g
 - Una terna accelerometrica costituita da 3 accelerometri monoassiali PCB Piezotronics modello 393A03 - Sensibilità 1000 mV/g.
 - Microfono BSWA, modello MP 201, con preamplificatore modello MA201
 - Massetti metallici per il fissaggio degli accelerometri
 - Sistema di acquisizione e analisi dati a 4 canali con software di gestione Samurai.

La calibrazione delle catene di misura è stata eseguita utilizzando il calibratore di vibrazioni Larson Davis 394M26 operante alla frequenza 159.2 Hz e 1 g di accelerazione rms.



- Strumentazione impegnata nelle attività di monitoraggio

3.4 Analisi dei rilievi

I rilievi eseguiti hanno permesso di determinare:

- L'entità e la variabilità dei transiti ferroviari in un numero statisticamente significativo alla sorgente;
- Le caratteristiche di emissione delle vibrazioni di origine ferroviaria;
- Le modalità di propagazione delle vibrazioni con una validazione sperimentale attraverso la funzione di trasferimento

3.4.1 Entità vibrazionale e relativa variabilità dei transiti ferroviari

I transiti ferroviari sono caratterizzati da una notevole variabilità, dovuta al transito di tipologie differenziate di veicoli ferroviari.

Nel periodo 12.00 del 27 Febbraio 2013 – 12.00 del 28 Febbraio 2013 sono stati censiti i seguenti transiti (si veda allegato):

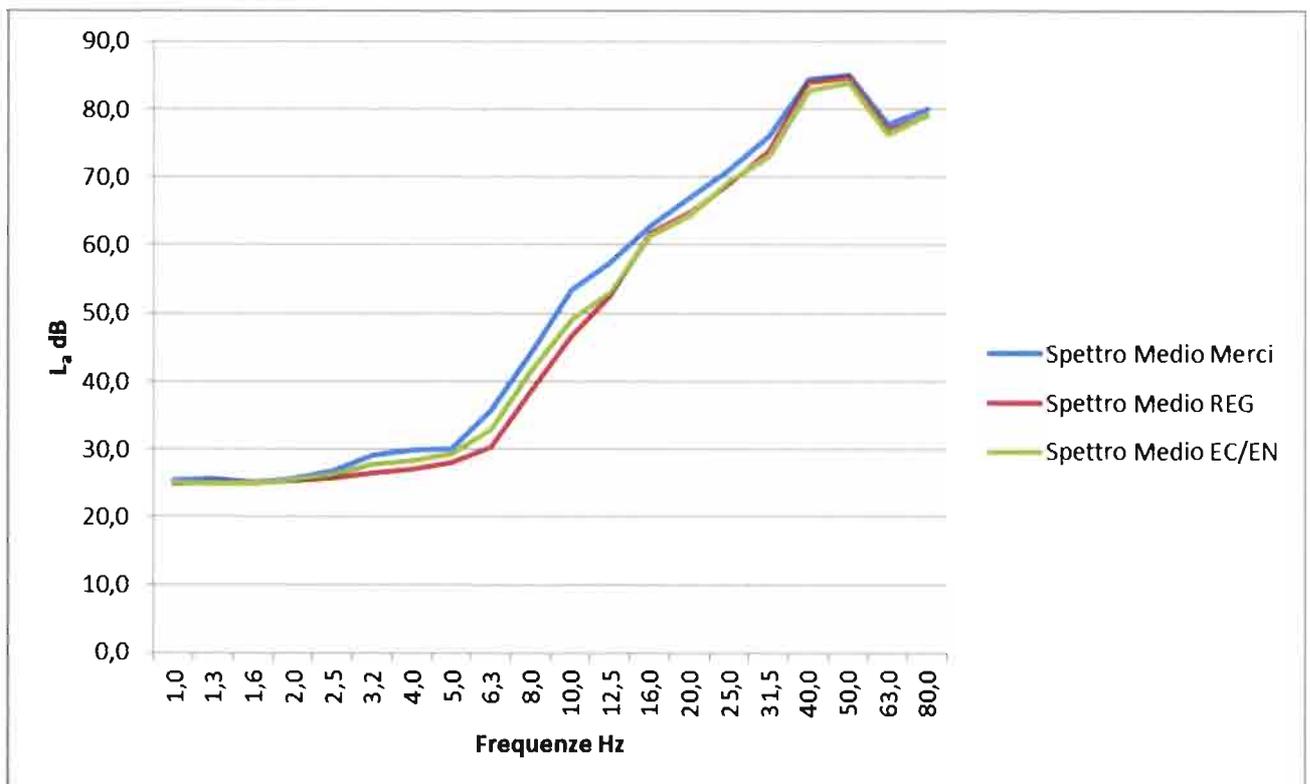
- N. 12 treni a lunga percorrenza (LP) EC/EN;
- N. 71 treni merci (CARGO, MERCI);
- N. 51 treni passeggeri regionali o simili (REG);

Le velocità dei convogli sono state sempre modeste (vel media 70 km/h), essendo la postazione di rilievo Sezione 1 a non oltre 200 m dalla stazione di Ponte Gardena.

Le caratteristiche summenzionate concorrono a determinare le caratteristiche spettrali di emissione e l'entità dell'emissione stessa, ma nel caso di interesse si è potuto determinare con buona affidabilità che l'emissione vibrazionale è caratterizzata da energia concentrata fra 30 e 80 Hz.

3.4.2 Caratteristiche di emissione delle vibrazioni di origine ferroviaria

Le vibrazioni rilevate nella postazione 1 della Sezione 1 sono di entità rilevante vista la vicinanza del punto di misura alla ferrovia, e non si differenziano molto in funzione della tipologia di transito.



Spettro medio dei transiti rilevati presso la postazione 1 della Sezione 1, suddivisi per tipologia di transito ferroviario

Gli spettri sopra riportati, rilevati a circa 0,5 m dalla paratia della galleria artificiale, sono stati utilizzati come riferimento per il calcolo previsionale a partire dalla sorgente. Si è inoltre ipotizzato che la velocità dei transiti ferroviari sia dell'ordine di 60 - 80 km/h (a seconda della distanza dalla stazione più prossima).

Tipologia di transito	Sezione 1 Postazione 1			Sezione 1 Postazione 2		
	L_a	L_{aw}	90° Percentile L_{aw}	L_a	L_{aw}	90° Percentile L_{aw}
	dB	dB	dB	dB	dB	dB
CARGO/MERCI	89,2	74,6	76,4	79,9	62,2	64,5
LP (EC/EN)	88,0	73,2	75,7	79,5	61,8	64,1
REG	88,5	73,6	75,3	78,6	61,0	63,4

Con queste ipotesi (livello L_{aw} 90° Percentile) si ritiene di calcolare l'immissione presso i potenziali ricettori con criteri particolarmente cautelativi.

Considerando i valori anche del secondo punto di misura si arriva a considerare una dissipazione dovuta al terreno di circa 0,6 dB/m

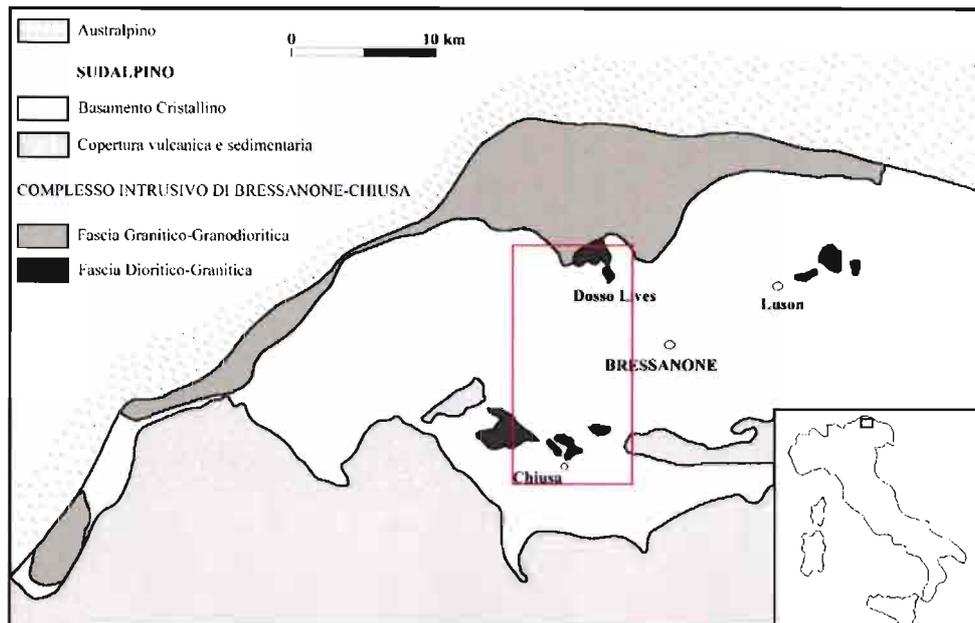
4.0 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

I dati necessari alla compilazione del quadro geologico dell'area di interesse sono stati ricavati dai risultati dei sondaggi geognostici eseguiti per la redazione dello studio geologico, cui si rimanda per eventuali approfondimenti.

L'area interessata dal presente lavoro (Fig. 3-1) si colloca in uno dei settori più complessi delle Alpi orientali, in prossimità della linea Insubrica, noto sistema di faglie che separa le unità Europa vergenti da quelle Africa vergenti. L'area rilevata si sviluppa a sud di tale lineamento, nel dominio Sudalpino o delle Alpi Meridionali, caratterizzato da un basamento ercinico e da successioni vulcaniche e sedimentarie di età permo-mesozoica.

Nel settore in studio è presente un basamento metamorfico formato da un complesso prevalentemente filladico appartenente all'Unità di Bressanone, al quale sono associate importanti intercalazioni di porfiroidi, (Ordoviciano sup.?); complessivamente questo substrato mostra un metamorfismo di età pre-permiana, mentre durante l'orogenesi alpina non si sviluppano nuove foliazioni metamorfiche. Sono inoltre presenti importanti intrusioni permiane (granito di Bressanone) con relativi corredo filoniano ed aureola di contatto conservati nelle filladi incassanti e una copertura vulcanica-sedimentaria riconducibile al Gruppo Vulcanico Atesino. Tale successione ed i plutoni permiani sono privi di metamorfismo alpino.

Elementi deformativi, prevalentemente di tipo fragile e fragile-duttile, si osservano lungo tutto il settore indagato e le principali faglie.



Schema geologico semplificato dell'area indagata (da Bargossi et alii, 1998).

Il substrato roccioso è spesso coperto da depositi superficiali attribuibili al Pleistocene superiore - Olocene, con predominanza di quelli di origine glaciale, riferibili all'ultimo evento glaciale culminato nel Last Glacial Maximum (LGM), alle successive fasi di ritiro e a dinamiche recenti (Piccola Età Glaciale).

Diffusi, ma con maggiore concentrazione sul tratto inferiore dei versanti, risultano i depositi riferibili alla dinamica di versante ed a processi di trasporto in massa. Il fondovalle del fiume Isarco presenta, nella parte settentrionale dell'area indagata (Bacino di Bressanone), i caratteri peculiari di una pianura intravalliva a sedimentazione prevalentemente alluvionale, con alcuni apporti dalle valli affluenti, talora con evidente presenza dei depositi di debris-flow (conoidi di origine mista) e limitati settori a sedimentazione di tipo palustre (Lago di Varna). Si riconoscono inoltre evidenti conoidi alluvionali, nei tratti bassi della Val Scaleres e della Val di Funes.

Ai fini del presente studio ci si è dedicati unicamente a quelle aree per le quali è prevedibile un potenziale impatto da vibrazioni, e dunque ci si è limitati ad analizzare i tratti della linea per i quali sono presenti potenziali ricettori entro una distanza di 50 m dal tracciato ferroviario.

La descrizione stratigrafica del suolo ai fini di uno studio di impatto da vibrazioni deve necessariamente ricondursi ad una classificazione delle tipologie di suolo estremamente più sintetica rispetto alle definizioni derivanti dallo studio geognostico utile ai fini della progettazione strutturale delle opere.

In particolare, l'interesse del presente studio è nella rilevazione di tre grandi categorie di suolo, per le quali si rileva un comportamento propagativo differente con parametri individuati dalla letteratura.

In base alla classificazione di Ungar e Bender le stratigrafie del terreno possono essere associate con le seguenti proprietà utili ai fini del presente studio.

Tipologia suolo	Velocità di propagazione delle onde longitudinali [m/s]	Fattore di smorzamento \square	Densità [kg/m ³]
Roccia	3500	0,01	2650
Sabbia, limo, ghiaia, loess	600	0,1	1600
Argilla, suolo argilloso	1500	0,1 – 0,2	1700

La classificazione ai fini vibrazionali è indicata nella seguente tabella.

Simbologia stratigrafica	Descrizione	Velocità di propagazione delle onde longitudinali [m/s]	Fattore di smorzamento \square	Densità [kg/m ³]
Aa	Terreno prevalentemente sabbioso, con eventuale presenza di limo, ghiaia, loess	600	0,1	1600
FMA	Roccia	3500	0,01	2650
FR	“	“	“	“

	QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 1: FORTEZZA – PONTE GARDENA					
	RELAZIONE GENERALE	COMMESSA IBL1	LOTTO 10	CODIFICA D22RG	DOCUMENTO IM 00 06 002	REV. A

5.0 STUDIO DELL'IMPATTO DA VIBRAZIONI

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 e la traversina su cui poggia raggiunge la struttura di appoggio sottostante, che può essere costituita da ballast (pietrisco di granulometria definita) o 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).

La vibrazione si propaga dalla struttura di supporto delle rotaie e raggiunge le pareti del tunnel; da qui si propaga attraverso il terreno sotto forma di onde elastiche. Benchè intercorra solo una piccola distanza, le onde che raggiungono le pareti del tunnel sono già state attenuate in modo consistente.

Le proprietà del suolo fanno sì che le pareti del tunnel possano vibrare in modo sensibilmente diverso: svariati autori (Ungar and Bender, 1975 and Kurzweil, 1979, NGI, 2004) hanno dimostrato che le vibrazioni di un tunnel scavato nella roccia sono inferiori di circa 5 dB (alle basse frequenze) e 12 dB (alle frequenze dell'udibile) alle vibrazioni di un tunnel scavato nella terra.

Un recente studio norvegese ha inoltre dimostrato come le frequenze superiori a 160 Hz sono generalmente dovute al rumore prodotto dal passaggio del treno e non invece dalle vibrazioni della rotaia.

Le vibrazioni che si propagano all'esterno del tunnel 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.

Ungar and Bender (1975) dimostrarono come vi sia uno scarso accoppiamento modale (e dunque una elevata perdita di energia vibrazionale) fra il tunnel e il terreno circostante per le onde di tipo trasversale (*shear waves*), e dunque queste onde possono essere trascurate nella propagazione delle vibrazioni di un tunnel ferroviario.

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 parete del tunnel, 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/ricevitore caratteristica dello stesso.

Il livello di vibrazione determinato nello spazio circostante da una sorgente eccitatrice è funzione della tipologia di sorgente e di una serie di attenuazioni dipendenti dalla forma della sorgente e dal tipo di onda considerata, dall'assorbimento del terreno, dall'eventuale presenza di discontinuità nello stesso 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 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 dB¹, 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.

¹ 0 dB \cong 1 μ m/s²

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).

Nel caso in oggetto la propagazione avviene quasi esclusivamente da sorgenti costituite da gallerie sotterranee (tunnel), e dunque 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.

Ungar and Bender (1975) dimostrarono come vi sia uno scarso accoppiamento modale (e dunque una elevata perdita di energia vibrazionale) fra il tunnel e il terreno circostante per le onde di tipo trasversale (*shear waves*), e dunque queste onde possono essere trascurate nella propagazione delle vibrazioni di un tunnel ferroviario.

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

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

- a) *Interazione ruota- rotaia*
- b) *Velocità del treno*
- c) *Comportamento corpo ferroviario*: tipo e dimensioni della linea (tunnel, trincea, superficie, rilevato, viadotto); spessore delle pareti della infrastruttura in tunnel o in trincea
- d) *Trasmissione nel terreno*: natura e caratteristiche del suolo; leggi di attenuazione nel suolo
- e) *Trasmissione agli edifici*: distanza plano-altimetrica tra linea e fondazioni edificio; caratteristiche del sistema fondazionale degli edifici; caratteristiche strutturali degli edifici .

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.

	QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 1: FORTEZZA – PONTE GARDENA					
	RELAZIONE GENERALE	COMMESSA IBL1	LOTTO 10	CODIFICA D22RG	DOCUMENTO IM 00 06 002	REV. A

5.1 Caratterizzazione della sorgente di vibrazioni

5.1.1 Interazione ruota-rotaia

La sorgente di vibrazioni ferroviaria consiste nel movimento del treno lungo le rotaie e dalle conseguenti forze che nascono nell'interazione fra ruota, rotaia e struttura di appoggio della rotaia. I treni, in fase di riposo, esercitano una forza statica data dal peso trasmesso dalle ruote alle rotaie e distribuito dalla rotaia stessa, dalle traversine, dal supporto (ballast...) e dal terreno: si tratta del carico statico.

Quando il treno si mette in movimento questa forza si sposta insieme al treno 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),
- Andatura instabile dei veicoli ferroviari;
- Accelerazione e decelerazione del treno,

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 (traversine, ballast e terreno),
- presenza di ghiaccio.

Un aumento del carico assiale aumenta ovviamente il carico dinamico generato dal passaggio del treno. 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...

Le variazioni nella struttura di supporto delle rotaie dipendono dalla geometria, rigidità e spaziatura fra le traversine. una traversina può perdere il contatto con il ballast sottostante, oppure si può verificare che una traversina sia supportata dal ballast meglio di quelle circostanti: in questo caso essa genererà una maggiore resistenza al passaggio del treno.

E' piuttosto comune individuare un picco corrispondente alla frequenza della spaziatura delle traversine e in funzione della velocità del treno.

Anche la rigidità e l'eterogeneità del ballast possono influenzare le forze generate dal transito del treno.

Come descritto sopra, il carico generato dai treni 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.

Tipo di carico	Carico	Contributo
Statico	Peso del treno	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 %

Il tipico spettro di frequenza generato dal transito di treni in gallerie è compreso fra 4 Hz e alcune centinaia di Hz. Vi possono essere picchi di frequenza compresi fra 80 e 100 dB.

5.1.2 Velocità dei treno

La velocità del treno 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:

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

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.

5.2 La propagazione del fenomeno vibratorio nel terreno

La realizzazione dei rilievi di vibrazioni ha consentito una conoscenza di tipo puntuale dello stato attuale delle vibrazioni su una tratta analoga a quella in progetto. Avendo tuttavia la necessità di estendere tale conoscenza a molteplici ricettori è necessario ricorrere all'uso di opportuni modelli previsionali di tipo teorico e/o empirico. Esistono in letteratura numerosi modelli che permettono il calcolo della propagazione delle vibrazioni ferroviarie, modelli che vanno da equazioni di tipo empirico a modelli BEM/FEM. Nel caso in oggetto si è ritenuto opportuno rifarsi ad alcuni modelli di validità generale, confrontando il risultati di due diversi approcci e utilizzando il risultato maggiormente cautelativo.

5.2.1 Metodo di Kim e Lee

Kim e Lee [3] hanno proposto di combinare l'attenuazione geometrica e dissipativa con la seguente relazione per materiali omogenei (valido per tutti i tipi di onde P, S ed R):

$$a(d, f) = a_0(d_0, f) \cdot \frac{r_0}{r} \cdot e^{-2\pi f \left(\frac{\eta}{c}\right) (r - r_0)}$$

dove a è l'accelerazione alla distanza r dalla sorgente, a_0 è l'ampiezza alla distanza r_0 dalla sorgente, f la frequenza, η il coefficiente di smorzamento, c la velocità di propagazione delle onde. Il fattore di smorzamento, η può essere desunto da dati di letteratura, mentre il coefficiente n dipende dal tipo di sorgente di vibrazioni e dal tipo di onda.

Localizzazione della sorgente	Tipologia di sorgente	Tipo di onda indotta nel terreno	coefficiente n
Superficie	Puntiforme	Onda di volume	2,0
		Onda superficiale	0,5
	Lineare	Onda di volume	1,0
		Onda superficiale	0

Sotterranea	Puntiforme	Onda di volume	1,0
	Lineare		0,5

Le sorgenti di vibrazione sono state caratterizzate attraverso i rilievi sperimentali descritti in precedenza. In particolare, sono stati eseguiti rilievi in un sito di interesse che presenta caratteristiche analoghe a quello in progetto (presenza di armamento con ballast, stessa tipologia di terreno), grazie ai quali è stato ricavato lo spettro di riferimento per il calcolo della propagazione vibratoria.

Il coefficiente n , in questo caso, è stato scelto pari a 1 (valido per onde di volume nel caso di sorgente puntiforme). La sorgente viene ipotizzata puntiforme in quanto tale criterio è maggiormente cautelativo.

Per tenere conto della velocità di transito dei veicoli si apporta al livello globale calcolato con la metodologia sopra esposta la correzione $\Delta L = 20 \log(v/v_{rif})$, dove $v_{rif} = 40$ km/h.

5.2.2 Metodo Pezzoli

P.Pezzoli [4] ha proposto di combinare l'attenuazione geometrica e dissipativa con la seguente relazione, che combina le onde di corpo, superficie e taglio come di seguito riportato:

- onde superficiali (onde di Rayleigh) per una percentuale di circa il 67%;
- onde di taglio per una percentuale di circa il 26%;
- onde di compressione e trazione per una percentuale di circa il 7%.

Per le linee in galleria si distinguono due casi:

A) *Linee in galleria profonda* dove generalmente prevalgono invece le onde di compressione e di taglio.

B) *Linee in galleria non profonda* dove le onde di superficie (onde di Rayleigh e Love) assumono maggior rilievo rispetto alle onde di compressione e di taglio.

Poiché lo specifico caso in esame prevede una sorgente irraggiante di tipo lineare, le onde di superficie sono attenuate solamente per effetto dello smorzamento. Le onde di corpo si attenuano comunque sia per effetto della distanza (effetto geometrico) che per effetto dello smorzamento intrinseco del materiale suolo.

L'effetto geometrico è indipendente dalla frequenza, mentre quello dissipativo cresce linearmente con la frequenza. In particolare la formula che viene utilizzata per il calcolo dell'attenuazione delle vibrazioni nella loro propagazione attraverso il terreno è:

$$L = 20 \cdot \log \left[10^{L_c/20} + 10^{L_t/20} + 10^{L_s/20} \right]$$

dove:

L_c, L_t, L_s sono rispettivamente i livelli trasmessi attraverso onde di compressione, taglio e superficie:

$$L_c = L_0 + 20 \cdot \log(\beta_c) - K_c \cdot \log\left(\frac{R}{R_0}\right) - \alpha_c \cdot (R - R_0) \cdot \frac{f}{V_c}$$

$$L_t = L_0 + 20 \cdot \log(\beta_t) - K_t \cdot \log\left(\frac{R}{R_0}\right) - \alpha_t \cdot (R - R_0) \cdot \frac{f}{V_t}$$

$$L_s = L_0 + 20 \cdot \log(\beta_s) - K_s \cdot \log\left(\frac{R}{R_0}\right) - \alpha_s \cdot (R - R_0) \cdot \frac{f}{V_s}$$

dove:

L e L_0 sono i livelli di vibrazioni in decibel attenuato e alla sorgente

R e R_0 sono le rispettive distanze riferite all'asse della linea

gli indici c, t, s si riferiscono rispettivamente alle onde di compressione, di taglio e di superficie

$\beta_c, \beta_t, \beta_s$ sono i fattori di importanza relativa tra i differenti meccanismi di propagazione delle onde del terreno

K_c, K_t, K_s sono i coefficienti di attenuazione geometrica per i differenti meccanismi di propagazione delle onde nel terreno

$\alpha_c, \alpha_t, \alpha_s$ sono i fattori di perdita per dissipazione per i differenti meccanismi di propagazione delle onde nel terreno [dB]

V_c, V_t, V_s sono le velocità di propagazione delle onde nel terreno [m/s]

f è la frequenza [Hz]

5.2.3 Incertezza di calcolo

E' noto come la valutazione previsionale delle vibrazioni a cui è soggetto un edificio in prossimità di infrastrutture dei trasporti sia estremamente difficoltosa a causa delle numerosissime variabili del calcolo. In letteratura si stima che la previsione del livello di vibrazione, pur conoscendo molti parametri con buona accuratezza, può avvenire con un livello di incertezza non inferiore a 10 dB.

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

- I livelli di vibrazione sono stati tarati su base sperimentale con una incertezza inferiore a 5 dB
- I dati di input delle sorgenti vibratorie sono stati considerati con riferimento alla massima emissione vibratoria, ottenendo così il valore massimo anche presso i ricettori.
- Per valutare in modo cautelativo le vibrazioni immesse nell'edificio si è trascurata la perdita per trasmissione all'interno dell'edificio, utilizzando dunque il valore di vibrazione senza perdite.
- La rappresentazione dei livelli di vibrazione viene fornita in termini di "classi di superamento", a fasce di 5 dB.

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

5.3 Caratterizzazione degli edifici

Quando le vibrazioni nel terreno raggiungono un edificio esse si propagano attraverso le sue fondazioni e successivamente alle altre parti dell'edificio (pareti, pavimenti, soffitti), trasferendo ad esse l'energia vibratoria.

Tali vibrazioni possono essere percepite come vibrazioni trasmesse al corpo delle persone o come rumore re-irradiato di bassa frequenza.

Le vibrazioni possono a loro volta mettere in movimento alcune parti o oggetti delle abitazioni (mobili, vetri, suppellettili) e questi possono generare rumore o causare danni a strumenti sensibili.

In alcuni casi le vibrazioni particolarmente elevate e ripetute nel tempo possono procurare un danno strutturale agli edifici, ma ben raramente questi effetti si verificano con infrastrutture dei trasporti.

5.3.1 Risposta degli edifici alle vibrazioni

Le vibrazioni trasmesse agli edifici possono provocare danni alle strutture edilizie in diverse forme.

Le vibrazioni dovute a strutture ferroviarie possono causare danni sotto forma di deformazione, vibrazione risonante o cedimenti.

Se l'infrastruttura è particolarmente vicina all'edificio si può verificare una deformazione strutturale dovuta all'onda vibratoria che si propaga sulla superficie del terreno.

Se le vibrazioni indotte hanno una concentrazione a frequenze prossime a quelle di risonanza naturale dell'edificio o di suoi elementi si verifica una risonanza strutturale.

Per alcuni tipi di terreno le vibrazioni possono inoltre provocare o accelerare rilassamenti strutturali o cedimenti dell'edificio.

Leventhall (1987) ha classificato i danni strutturali in tre categorie:

- Piccoli danni (danni architettonici) – crepe di pochi millimetri di larghezza negli intonaci, distacchi di intonaci. Sono sufficienti interventi di tipo “cosmetico”.
- Danni importanti – crepe in pareti e travi. Possono arrivare a 10 mm di ampiezza. Distacchi di intonaci dai soffitti ecc. Richiedono seri interventi di riparazione.
- Danni molto rilevanti – crepe fino a 25 mm di ampiezza. Possono compromettere la stabilità dell'edificio. Richiedono interventi molto importanti per mantenere l'agibilità dell'edificio.

Le cause più normali di danni strutturali agli edifici sono dovute ad effetti termici, infiltrazioni di umidità, cedimenti del terreno, gelate del terreno, restringimenti ed espansioni del terreno, effetti chimici, presenza di alberi di alto fusto....

Anche piccole trasformazioni operate in edifici antichi o vetusti possono inoltre comportare danni.

In edifici recenti si possono invece generare danni per effetto di modifiche non progettate o difetti strutturali.

Pertanto, risulta solitamente improbabile che la causa dei danni siano le vibrazioni ferroviarie; molto più probabile è la concomitanza di più cause, come ad esempio l'alterazione del livello della falda: in questo caso le vibrazioni possono accelerare un processo già in corso.

Il danno potenziale agli edifici dipende dall'età dell'edificio, dalle sue dimensioni, dalle risonanze strutturali, dal tipo di costruzione.

Benchè la norma UNI 9916 riporti alcuni valori significativi, molte ricerche dimostrano come il limite di sicurezza per gli edifici sia dell'ordine di 50 mm/s, mentre la soglia per il danno architettonico è di 5 mm/s e per gli edifici storici si riduce a 2 mm/s.

Le vibrazioni che possono causare danno strutturale o cosmetico agli edifici sono generalmente molto più elevate di quelle che vengono considerate accettabili per il disturbo alle persone.

Ciononostante, spesso si verifica che le persone possano attribuire alle vibrazioni delle infrastrutture il motivo di danni “cosmetici” (piccole crepe, distacco di intonaci), mentre invece le cause sono da ricercarsi in altri problemi.

Inoltre, molte persone tendono ad associare il rumore re-irradiato alle vibrazioni e questo induce a preoccupazione e stati di ansia generati dalle vibrazioni.

Infine, spesso ci si concentra sui danni strutturali o cosmetici agli edifici perché questi danni sono molto più riconoscibili rispetto a quelli legati al disturbo.

	QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 1: FORTEZZA – PONTE GARDENA					
	RELAZIONE GENERALE	COMMESSA IBL1	LOTTO 10	CODIFICA D22RG	DOCUMENTO IM 00 06 002	REV. A

5.3.2 La propagazione delle vibrazioni negli edifici

Il modello semplificato di propagazione illustrato in precedenza si riferisce ai soli fenomeni che avvengono nel terreno, supposto omogeneo ed isotropo (perlomeno all'interno di ogni strato). In presenza di edifici dalla struttura complessa, collegati al terreno mediante sistemi di fondazione di vario genere, accade che i livelli di accelerazione riscontrabili all'interno degli edifici stessi possono presentare sia attenuazioni, sia amplificazioni rispetto ai livelli sul terreno.

In particolare, diversi sistemi di fondazione producono una attenuazione più o meno pronunciata dei livelli di accelerazione misurabili sulla fondazione stessa rispetto a quelli nel terreno circostante; tale aspetto è legato al fatto che l'interfaccia terreno-struttura non è perfettamente solidale, e pertanto genera fenomeni dissipativi. Detto fenomeno è condizionato dalla tipologia delle fondazioni (a platea, su plinti isolati, su travi rovesce, su pali, etc.). Nel caso di fondazioni a platea la grande area di contatto con il terreno determina una perdita di accoppiamento praticamente di 0 dB alle basse frequenze, sino alla frequenza di risonanza della fondazione.

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

Va inoltre preso in esame il fenomeno della risonanza strutturale di elementi dei fabbricati, in particolare dei solai: allorché la frequenza di eccitazione coincide con la frequenza naturale di oscillazione libera della struttura, la stessa manifesta un rilevante aumento dei livelli di vibrazione rispetto a quelli presenti alla base della stessa.

La propagazione delle vibrazioni dalle fondazioni di un edificio all'ambiente ricevente all'interno dell'edificio è un problema estremamente complesso, che richiede peraltro la conoscenza esatta della struttura dell'edificio, e può dunque essere studiato solo in fase di progettazione di un nuovo edificio e richiede solitamente metodi numerici agli elementi finiti.

Nel presente studio ci si deve necessariamente basare su considerazioni molto meno dettagliate, che tuttavia hanno solide basi sperimentali ed esperienziali.

La propagazione delle vibrazioni attraverso un edificio e la radiazione sonora conseguente viene stimata utilizzando formulazioni empiriche o modelli teorici.

Le formulazioni più note si basano sugli studi di Kurzweil e Melke, e sono anche disponibili in testi quali *Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control*.

L'approccio consiste nel trattare la vibrazione proveniente dal terreno con una serie di fattori correttivi dipendenti dalla particolare configurazione dell'edificio.

<i>Fattore correttivo</i>	<i>Motivazione</i>	<i>Modalità di correzione</i>
Accoppiamento terreno-fondazioni	Fattore correttivo che rappresenta la riduzione di vibrazione nell'interfaccia suolo-fondazioni.	I fattori correttivi da utilizzare consigliati dallo studio della Federal Transit Administration [10] sono riportati nei diagrammi seguenti. La correzione risulta nulla al piano delle fondazioni. Possono essere utilizzati valori misurati in luogo delle correzioni generiche.
Trasmissione attraverso l'edificio	L'ampiezza di vibrazione subisce una attenuazione propagandosi lungo l'edificio.	Il comportamento tipico assume che vi sia una attenuazione da 1 a 2 dB per ciascun piano.
Risonanze strutturali dei solai	L'ampiezza di vibrazione viene amplificata dalle risonanze strutturali di solai/soffitti.	Per strutture con telaio in legno la frequenza fondamentale di risonanza dei solai è solitamente nel range 15-20-Hz. Strutture in cemento armato hanno frequenze di risonanza nella gamma 20-30-Hz. L'amplificazione nel range di risonanza implica una amplificazione di almeno 6 dB.

5.3.3 Accoppiamento terreno – fondazioni edificio

La quantità di vibrazioni che si trasmette agli edifici dipende dall'accoppiamento fra il terreno e le fondazioni. Solitamente vi è un'attenuazione delle vibrazioni in questo passaggio.

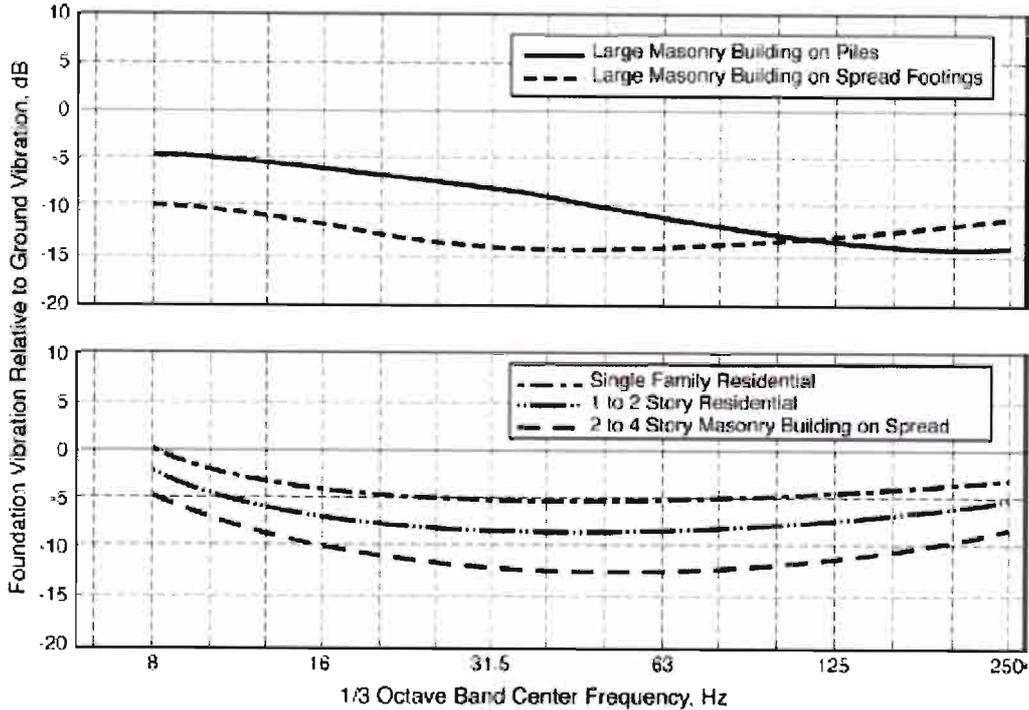
Per fondazioni a platea, a contatto con il terreno sottostante e sottoposte dunque alle stesse vibrazioni non vi è solitamente alcuna attenuazione (0 dB) per le frequenze fino alla frequenza di risonanza della struttura della platea. (Remington *et al.*, 1987).

L'accoppiamento per edifici con strutture leggere è anch'esso stimato essere pari a 0 dB da Kurzweil, 1979.

Per altri tipi di fondazioni (pali...) l'accoppiamento varia fra 2 e 15 dB in funzione della frequenza e della fondazione (Remington, 1987; Kurzweil, 1979). Per edifici fondati direttamente su strati rocciosi l'accoppiamento è 0 (Kurzweil, 1979).

La riduzione delle vibrazioni fra terreno ed edificio è maggiore per oscillazioni verticali poiché l'edificio risulta strutturalmente più debole in senso orizzontale.

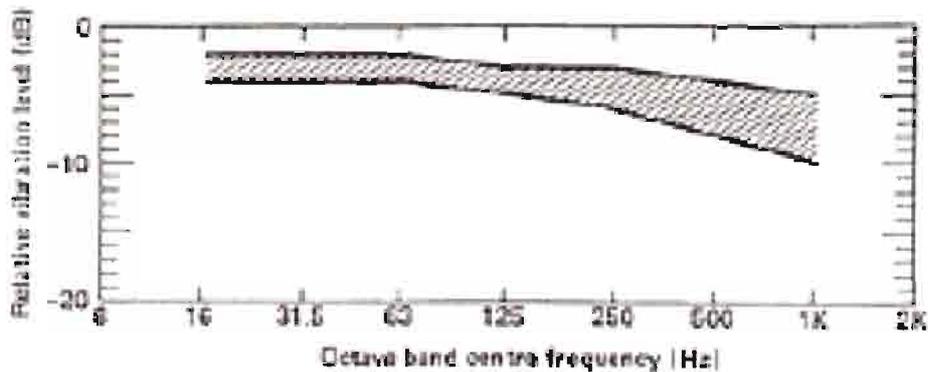
Nel presente lavoro i comportamenti strutturali verranno stimati sulla base dei seguenti diagrammi.



Risposta delle fondazioni per diverse tipologie di edifici, FTA (USA)

5.3.4 Trasmissione attraverso l'edificio

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



Attenuazione da un piano al successivo

Ungar and Bender (1975) proposero di valutare l'attenuazione delle vibrazioni attraverso l'edificio con la seguente relazione:

$$L_p = L_g - 3n \quad [\text{dB}]$$

dove L_g è la vibrazione alle fondazioni e n è il numero di piani dell'edificio (o meglio il numero di piani interposti fra le fondazioni e il piano per il quale interessa calcolare la vibrazione). Dunque viene calcolata una riduzione di 3 dB per ogni piano.

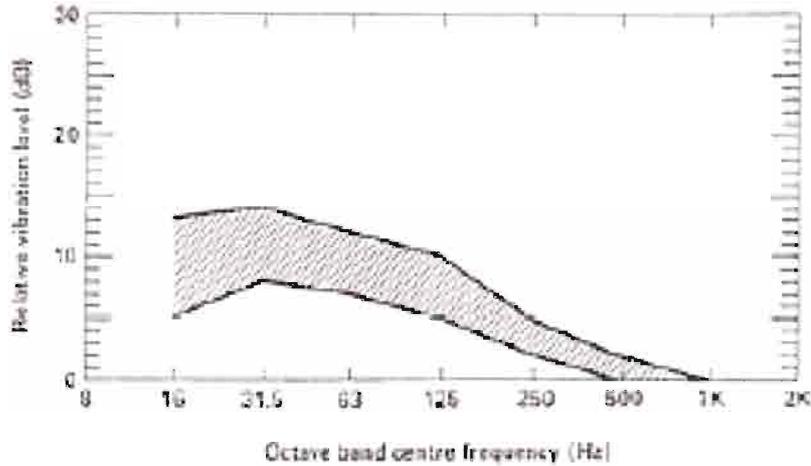
5.3.5 Risonanze strutturali dei solai

Pareti, solai e soffitti di un edificio talvolta amplificano le vibrazioni. Edifici con strutture leggere in genere non amplificano particolarmente, anche se si possono verificare amplificazioni ai piani superiori (Kurzweil, 1979). L'amplificazione può variare tra un fattore 0.5 (riduzione) e 2 (amplificazione) nella gamma di frequenza 25 - 30 Hz, anche se si sono osservate amplificazioni fino a un fattore 5 (Leventhall, 1987). Questo fenomeno è causato dal fatto che parti diverse di un edificio possono avere caratteristiche diverse di rigidità, massa e smorzamento, con conseguenti diverse frequenze naturali di oscillazione. Di seguito vengono indicate alcune frequenze naturali tipiche.

<i>Elemento edilizio</i>	<i>Frequenza naturale</i> [Hz]
Pali	5-50
Pavimenti e solette	10-30
Finestre	10-100
Soffitti intonacati	10-20

Dawn and Stanworth (1979) hanno dimostrato che vi possono essere notevoli differenze nei livelli di vibrazione e nelle frequenze fra due pavimenti di un edificio. In genere, l'amplificazione è nella gamma 5 – 15 dB per le frequenze 16 – 80 Hz (Remington, 1987). E' comune che pavimento amplifichi nella gamma 10 – 30 Hz poichè a quelle frequenze le risonanze della struttura coincidono con i picchi di vibrazione prodotti dal transito del treno.

Nella figura successiva viene evidenziato il possibile campo di amplificazione delle vibrazioni dovuto alla risonanza dei solai, che come si nota oscilla fra 5 e 12 dB nel campo di frequenze rilevanti dal punto di vista ferroviario.



Amplificazione prodotta dai solai

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

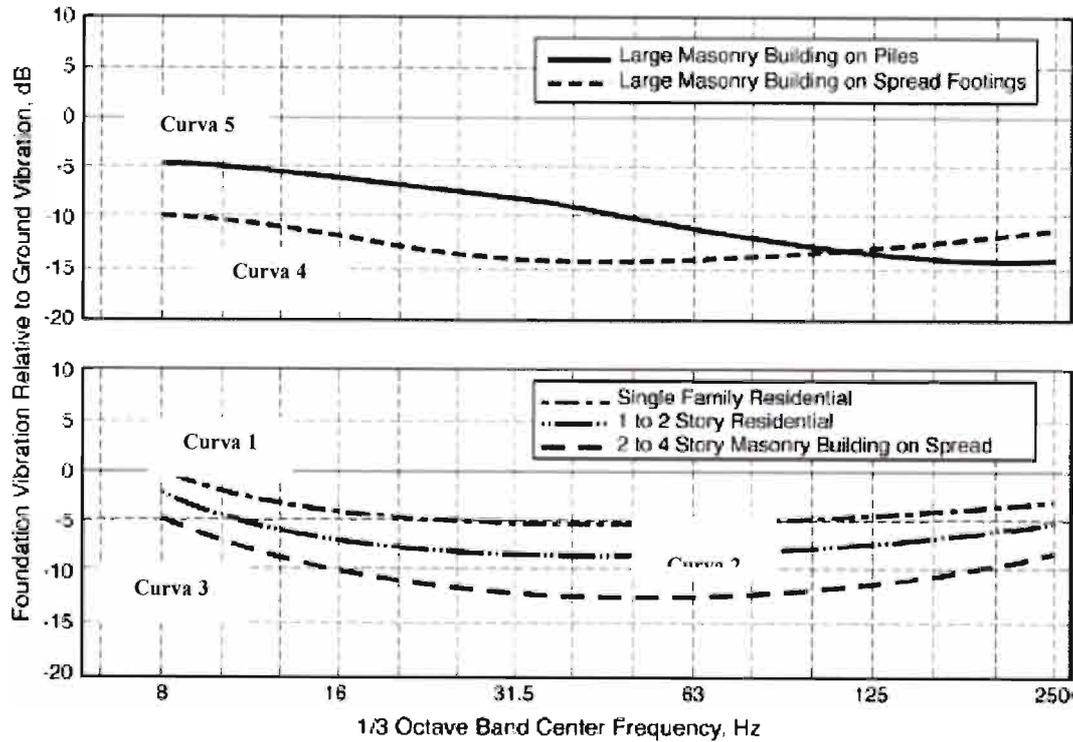
5.3.6 Individuazione delle vibrazioni trasmesse a ciascun edificio e stima della risposta

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

In base alle caratteristiche delle fondazioni dell'edificio si definisce un fattore di attenuazione per le fondazioni secondo il seguente schema.

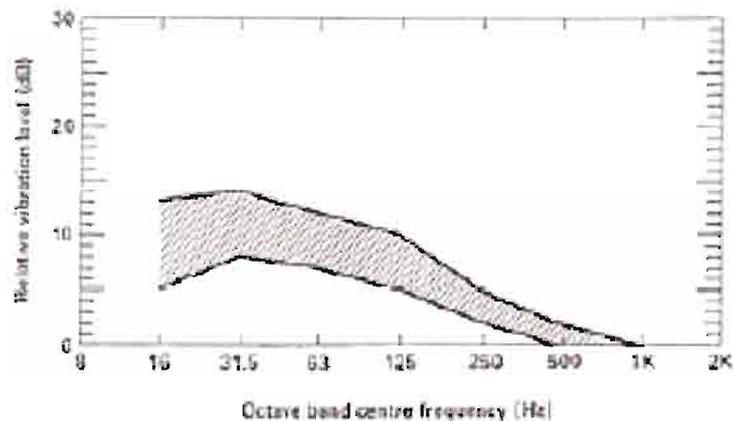
<i>Tipologia fondazioni</i>	<i>Tipologia edificio</i>	<i>Fattore correttivo [dB]</i>
Fondazioni a platea	Villetta monofamiliare	curva 1
“	Palazzina 1-2 piani	curva 2
“	Palazzina 2-4 piani	curva 3
“	Edificio di grandi dimensioni (industriale, commerciale, palazzo multipiano)	curva 4
Fondazioni su pali	Edificio di grandi dimensioni (industriale, commerciale, palazzo multipiano)	curva 5

La correzione in frequenza è desunta dal seguente diagramma.



Fattori correttivi dovuti alla tipologia di fondazione

Infine, in base alle caratteristiche della struttura si definisce un fattore di amplificazione per i solai. Nella figura successiva viene evidenziato il possibile campo di amplificazione delle vibrazioni dovuto alla risonanza dei solai, che come si nota oscilla fra 5 e 12 dB nel campo di frequenze rilevanti dal punto di vista ferroviario. Si è considerata la massima amplificazione possibile, dedotta dall'estremo superiore del campo di variabilità proposto dalle curve.



Amplificazione prodotta dai solai

5.3.7 La stima del rumore re-irradiato

Per stimare il livello di pressione sonora in un ambiente a partire da livello di vibrazione L_a Kurzweil (1979) propone la seguente relazione:

$$L_p(\text{room}) = L_a(\text{room}) - 20 \log(f) + 37$$

dove f è la frequenza centrale della banda di ottava considerate e L_a il livello di accelerazione sulle pareti della stanza.

Il più recente documento della Federal Transit Administration - USA propone la stima del livello di rumore re-irradiato a partire dalla vibrazione delle strutture L_v con la seguente relazione:

$$L_A = L_v + K_{A-wt}$$

dove L_v è il livello di vibrazione delle superfici della stanza (espresso con riferimento a 1×10^{-6} inch/sec, ossia $2,54 \times 10^{-8}$ m/s) e K_{A-wt} la ponderazione A definita dalla IEC 60651.

In questa relazione si trascura tuttavia sia il fattore di di radiazione delle superfici, sia l'assorbimento interno degli ambienti.

Un approccio più dettagliato deve tenere conto del valore medio del coefficiente di efficienza di irradiazione acustico (σ) e del coefficiente di assorbimento acustico (α) che caratterizzano le superfici, della dimensione e forma della stanza e della distribuzione ed entità del campo di vibrazione sulle superfici vibranti.

Studi basati su considerazioni teoriche e soprattutto su rilievi in sito, hanno consentito di formulare la seguente relazione che lega i livelli di pressione sonora con i livelli di vibrazione presenti sulle superfici irraggianti:

$$L_p(f) = L_{v,rs}(f) - 10 \log[(A)/(4 S_{vib})] + 10 \log(\sigma) = L_{v,rs}(f) - K_{rs}$$

essendo:

$L_p = 20 \log(P/P_0)$ livello di pressione sonora in dB (dBre 20 μPa)

$P_0 = 20 \mu Pa$ pressione acustica di riferimento

$L_{v,rs} = 20 \log(V/V_{0,rs})$ livello di vibrazione in termini di velocità per il rumore solido in dB (dBre $V_{0,rs} = 50 \text{ nm/s}$)

$V_{0,rs} = 50 \times \text{nm/s}$ velocità di riferimento relativamente al rumore solido

f_j frequenza per la componente j-esima

σ coefficiente di efficienza di irradiazione

S_{vib} superficie del locale interessata alle vibrazioni

$A = \sum \alpha_i \times S_i = \alpha_{medio} \times S$ assorbimento acustico totale delle superfici del locale

$S = \sum_i S_i$ superficie totale del locale

α_i coefficiente di assorbimento acustico della parete i-esima

$\alpha_{medio} = A / S$ coefficiente di assorbimento acustico medio delle pareti

La costante acustica relativa al rumore solido è quindi un valore caratteristico del locale indagato:

$$Krs = -10 \log[(A)/(4 \times S_{vib})] + 10 \log(\sigma)$$

Attraverso la correlazione tra il livello di pressione sonora (Lp) e il livello di vibrazione in termini di velocità per il rumore solido (Lv,rs) è possibile una valutazione sperimentale della costante acustica relativa al rumore solido (Krs).

Valori attesi di Krs per una stanza abitata sono valutabili nel modo seguente:

$\sigma = 0,8 \div 1,2$ coefficiente di efficienza di irradiazione

$\alpha_{medio} = 0,1 \div 0,3$ coefficiente di assorbimento acustico medio delle pareti

$S_{vib} / S = 1/4 \div 1/6$ rapporto tra le superfici; in genere rapporto tra $1/2$ soffitto più $1/2$ pavimento e la superficie totale (soffitto più pavimento, più pareti).

In tale ipotesi il campo di variabilità di Krs è relativamente ampio:

$$Krs = 2 \div 12 \text{ dB}$$

Le relazioni tra i livelli di rumore solido e i livelli vibrazionali sono pertanto date dalle:

$$Lp(fj) = Lv,rs(fj) + Krs$$

$$Lp(fj) = Lv(fj) + Krs - 34 \text{ dB}$$

$$Lp(fj) = La(fj) + Krs - 20 \times \log(f) + 10 \text{ dB (9)}$$

essendo:

$Lv = 20 \log(V/Vo)$ livello di vibrazione in termini di velocità in dB ($dBre$ \square $Vo = 1 \text{ nm/s}$)

$Vo = 1 \text{ nm/s}$ velocità di riferimento

$La = 20 \log(A/Ao)$ livello di vibrazione in termini di accelerazione in dB ($dBre$ $Ao = 1 \mu\text{m/s}^2$)

$Ao = 1 \mu\text{m/s}^2$ accelerazione di riferimento

I coefficienti in decibel sopra esposti (-34 dB e +10 dB) sono determinati da:

$$20 \log[(Vo)/Vo,rs] \cong -34 \text{ dB}$$

$$20 \log[(Vo)/Vo,rs] + 20 \log[Ao/(2 \times \pi \times Vo)] \cong -34 \text{ dB} + 44 \text{ dB} = 10 \text{ dB}$$

Nel caso del presente studio la relazione utilizzata è stata la seguente:

$$L_p(f) = L_a(f) + 6 - 20 \log(f) + 10 \text{ dB}$$

Dunque è stato utilizzato un valore intermedio per il parametro K_{rs} (che può variare da 2 a 12 dB in funzione del tipo di ambiente), pari a 6 dB.

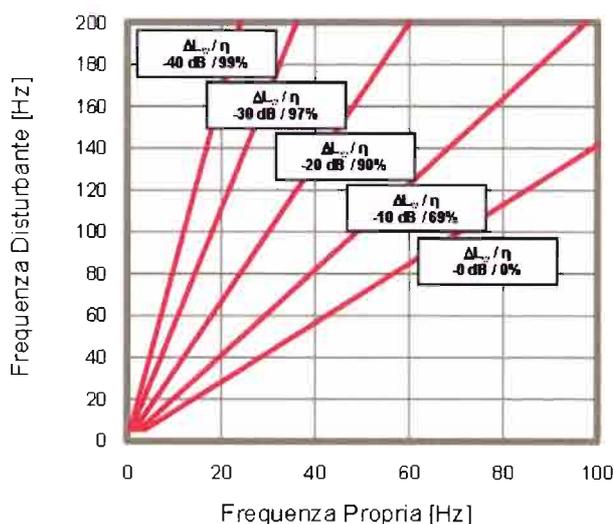
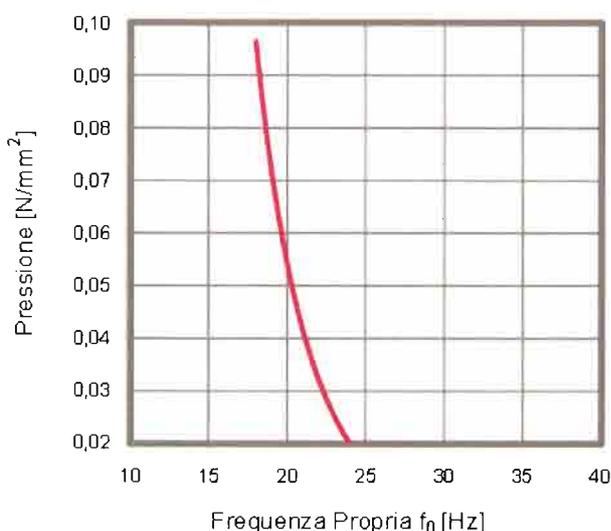
Per la determinazione del livello di accelerazione presente all'interno degli ambienti è stato utilizzato il livello medio previsto sul transito di un convoglio ferroviario. Il livello sonoro è stato calcolato utilizzando la gamma di frequenza 1 Hz – 1000 Hz.

6.0 INDICAZIONI PROGETTUALI PER GLI INTERVENTI DI ISOLAMENTO ALLE VIBRAZIONI

6.1 Considerazioni progettuali

In base ai rilievi sperimentali emergono le seguenti osservazioni:

- L'entità del fenomeno vibratorio è solitamente molto variabile in funzione del **tipo di convoglio** e della sua **velocità**. Nel caso specifico si è registrata una notevole variabilità fra il traffico merci ed il traffico passeggeri leggero, constatata peraltro anche in altre circostanze, dovuta alle caratteristiche intrinseche delle due tipologie;
- Dal punto di vista progettuale si ritiene di dover valutare il caso peggiore, e dunque viene considerato l'evento associato al transito di treni merci (CARGO, MERCI);
- La **distanza critica** che potrebbe indurre superamenti della soglia di percezione secondo UNI 9614 risulta essere pari a circa **8 - 10 m** (in funzione della tipologia di edificio).
- Lo spettro della vibrazione disturbante è compreso fra **30 e 80 Hz**, e dunque gli interventi devono tenere conto di tale indicazioni per la scelta della tipologia di antivibrante. In particolare, esistono soluzioni che prevedono l'isolamento alle vibrazioni utilizzando materassini in materiale resiliente o supporti in gomma con caratteristiche diverse. Per una corretta progettazione occorre individuare la pressione statica esercitata dall'armamento e dal veicolo ferroviario transitante, e successivamente viene determinato l'isolamento alle vibrazioni in termini di riduzione a ciascuna frequenza;



Esempio di specifiche tecniche del materiale resiliente sotto-ballast, da cui si può ricavare l'attenuazione alle vibrazioni in funzione della frequenza disturbante.

6.2 Individuazione delle tratte critiche

Sulla base di quanto sopra esposto non sono state individuate tratte critiche.

7.0 CONCLUSIONI

La presente relazione ha avuto come scopo l'individuazione delle problematiche di propagazione delle vibrazioni previste dal Quadruplicamento della Linea Fortezza – Verona relativo al Lotto 1 Fortezza – Ponte Gardena. Sono state eseguite rilevazioni vibrometriche finalizzate alla quantificazione previsionale delle potenziali vibrazioni immesse dalla nuova linea.

Il calcolo previsionale ha permesso di stabilire che non esistono **tratti di linea critici**