

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP J34G18000150001

U.O. ARCHITETTURA AMBIENTE E TERRITORIO

PROGETTO DEFINITIVO

**LINEA VERONA - BRENNERO E LINEA FORTEZZA - SAN CANDIDO
NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE DI RIGA"**

ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE

STUDIO VIBRAZIONALE

RELAZIONE GENERALE

SCALA:

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

IB01 00 D 22 RG IM0004 002 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	C. Glanoble	Ottobre 2020	A. Velocca A. Corvaja	Ottobre 2020	C. Mazzocchi	Ottobre 2020	D. Ludovici Ottobre 2020



File: IB0100D22RGIM0004002A.DWG

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Indice

1	RIFERIMENTI NORMATIVI	2
1.1	IL QUADRO DELLE NORME DI RIFERIMENTO	2
2	AREA DI STUDIO.....	7
2.1	INQUADRAMENTO TERRITORIALE	7
2.2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	8
3	INDAGINI VIBRAZIONALI	11
4	STUDIO DELL'IMPATTO DA VIBRAZIONI.....	14
4.1	LE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO	14
4.2	CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE DI VIBRAZIONI	15
4.2.1	Interazione ruota-rotai	15
4.2.2	Velocità dei treni.....	17
4.2.3	Corpo ferroviario	17
4.3	LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO	18
4.4	LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NELLE STRUTTURE EDILIZIE.....	22
4.4.1	Risposta degli edifici alle vibrazioni	22
4.4.2	Accoppiamento terreno – fondazioni edificio	24
4.4.3	Trasmissione attraverso l'edificio.....	25
4.4.4	Risonanze strutturali dei solai.....	26
4.4.5	Individuazione delle vibrazioni trasmesse a ciascun edificio e stima della risposta	28
4.4.6	Rumore trasmesso per via solida dalle strutture.....	29
5	LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO	31
5.1	PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO	31
5.2	TRAFFICO DI ESERCIZIO	31
5.3	LIVELLI COMPLESSIVI.....	33
5.3.1	Individuazione dei livelli di vibrazione	33
5.3.2	Livello di emissione massima	33
5.3.3	Livello di emissione complessivo.....	34
5.4	INDIVIDUAZIONE DELLE POTENZIALI AREE CRITICHE.....	39
6	CONCLUSIONI.....	40

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

1 RIFERIMENTI NORMATIVI

1.1 IL QUADRO DELLE NORME DI RIFERIMENTO

A differenza del rumore ambientale, regolamentato a livello nazionale dalla Legge Quadro n. 447/95, non esiste al momento alcuna legge che stabilisca limiti quantitativi per l'esposizione alle vibrazioni. Esistono invece numerose norme tecniche, emanate in sede nazionale ed internazionale, che costituiscono un utile riferimento per la valutazione del disturbo in edifici interessati da fenomeni di vibrazione.

Per quanto riguarda il disturbo alle persone, i principali riferimenti sono costituiti dalla norma ISO 2631 / Parte 2 "*Evaluation of human exposure to whole body vibration / "Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz)"*". La norma assume particolare rilevanza pratica poiché ad essa fanno riferimento le norme tecniche per la redazione degli Studi di Impatto Ambientale relativi alla componente ambientale "Vibrazioni", contenute nel D.P.C.M. 28/12/1988. Ad essa, seppur con alcune non trascurabili differenze, fa riferimento la norma UNI 9614:1990 "*Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo*".

Si riporta di seguito la principale normativa tecnica esistente in riferimento all'aspetto ambientale vibrazioni.

ISO2631 "Valutazione sull'esposizione del corpo umano alle vibrazioni"

La ISO 2631-2 si applica a vibrazioni trasmesse da superfici solide lungo gli assi x, y e z per persone in piedi, sedute o coricate. Il campo di frequenze considerato è 1÷80 Hz e il parametro di valutazione è il valore efficace dell'accelerazione a_{rms} definito come:

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

dove $a(t)$ è l'accelerazione in funzione del tempo, T è la durata dell'integrazione nel tempo dell'accelerazione. La norma definisce tre curve base per le accelerazioni e tre curve base per le velocità (in funzione delle frequenze di centro banda definite per terzi di ottava) che rappresentano le curve approssimate di uguale risposta in termini di disturbo, rispettivamente per le accelerazioni riferite all'asse Z, agli assi X, Y e alla combinazione dei tre assi.

L'Annex A della ISO 2631-2 (che non rappresenta peraltro parte integrale della norma) fornisce informazioni sui criteri di valutazione della risposta soggettiva alle vibrazioni; in pratica sono riportati

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

i fattori di moltiplicazione da applicare alle curve base delle accelerazioni e delle velocità al variare del periodo di riferimento (giorno e notte), del tipo di vibrazione (vibrazioni continue o intermittenti, vibrazioni transitorie) e del tipo di insediamento (ospedali, laboratori di precisione, residenze, uffici, industrie). Le vibrazioni devono essere misurate nel punto di ingresso nel corpo umano e deve essere rilevato il valore di accelerazione r.m.s. perpendicolarmente alla superficie vibrante. Nel caso di edifici residenziali in cui non è facilmente definibile un asse specifico di vibrazione, in quanto lo stesso edificio può essere usato da persone in piedi o coricate in diverse ore del giorno, la norma presenta una curva limite che tiene conto delle condizioni più sfavorevoli combinate in tre assi.

UNI 9614:1990 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo"

La norma è sostanzialmente in accordo con la ISO 2631-2. Tuttavia, sebbene le modalità di misura siano le stesse, la valutazione del disturbo è effettuata sulla base del valore di accelerazione r.m.s. ponderato in frequenza, il quale è confrontato con una serie di valori limite dipendenti dal periodo di riferimento (*giorno*, dalle 7:00 alle 22:00, e *notte*, dalle 22:00 alle 7:00) e dalle destinazioni d'uso degli edifici. Generalmente, tra le due norme, la UNI 9614:1990 si configura come più restrittiva.

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

Luogo	Accelerazione [m/s ²]	L [dB]
Aree critiche	3.3 * 10 ⁻³	71
Abitazioni (notte)	5.0*10 ⁻³	74
Abitazioni (giorno)	7.2*10 ⁻³	77
Uffici	14.4*10 ⁻³	83
Fabbriche	28.8*10 ⁻³	89

Tabella 1-1 Valori di soglia di vibrazione relativi al disturbo alle persone (UNI 9614:1990)

Considerato che gli effetti prodotti dalle vibrazioni sono differenti a seconda della frequenza delle accelerazioni, vanno impiegati dei filtri che ponderano le accelerazioni a seconda del loro effetto sul soggetto esposto. Tali filtri rendono tutte le componenti dello spettro equivalenti in termini di percezione e quindi di disturbo. I simboli dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza e del corrispondente livello sono rispettivamente, a_w e L_w . Quest'ultimo, espresso in dB, è definito come $L_w = 20 \log_{10} (a_w / 10^{-6} \text{ m/s}^2)$. Il filtro per le accelerazioni che si trasmettono secondo l'asse z prevede una attenuazione di 3 dB per ottava tra 4 e 1 Hz, una attenuazione nulla tra 4 e 8 Hz ed una attenuazione di 6 dB per ottava tra 8 e 80 Hz. Il filtro per le accelerazioni che si trasmettono

	<p style="text-align: center;">LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE</p> <p style="text-align: center;">PROGETTO DEFINITIVO</p>					
	<p>STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale</p>	<p>COMMESSA IB01</p>	<p>LOTTO 00 D 22</p>	<p>CODIFICA RG</p>	<p>DOCUMENTO IM0004 002</p>	<p>REV. A</p>

secondo gli assi x e y prevede un'attenuazione nulla tra 1 e 2 Hz e una attenuazione di 6 dB per ottava tra 2 e 80 Hz. La banda di frequenza 1-80 Hz deve essere limitata da un filtro passabanda con una pendenza asintotica di 12 dB per ottava. Nel caso la postura del soggetto esposto non sia nota o vari nel tempo, va impiegato il filtro definito nel prospetto I della norma, ottenuto considerando per ogni banda il valore minimo tra i due filtri suddetti. In alternativa, i rilievi su ogni asse vanno effettuati utilizzando in successione i filtri sopraindicati; ai fini della valutazione del disturbo verrà considerato il livello dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza più elevato. Nell'Appendice della norma UNI 9614:1990, che costituisce parte integrante della norma, si indica che la valutazione del disturbo associato alle vibrazioni di livello costante deve essere svolta confrontando i valori delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza, o i corrispondenti livelli più elevati riscontrati sui tre assi, con una serie di valori limite riportati nei prospetti II e III. Quando i valori o i livelli delle vibrazioni in esame superano i limiti, le vibrazioni possono essere considerate oggettivamente disturbanti per il soggetto esposto. Nel caso di vibrazioni di tipo impulsivo è necessario misurare il livello di picco dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza; tale livello deve essere successivamente diminuito di 3 dB al fine di stimare il corrispondente livello efficace. I limiti possono essere adottati se il numero di eventi impulsivi giornalieri non è superiore a 3. Nel caso si manifestino più di 3 eventi impulsivi giornalieri i limiti fissati per le abitazioni, gli uffici e le fabbriche vanno diminuiti in base al numero di eventi e alla loro durata, moltiplicandoli per un fattore correttivo F. Nessuna riduzione può essere applicata per le aree critiche. Nel caso di impulsi di durata inferiore a 1 s si deve porre $F = 1.7 \cdot N^{-0.5}$. Per impulsi di durata maggiore si deve porre $F = 1.7 \cdot N^{-0.5} \cdot t^{-k}$, con $k = 1.22$ per pavimenti in calcestruzzo e $k = 0.32$ per pavimenti in legno. Qualora i limiti così calcolati risultassero inferiori ai limiti previsti per le vibrazioni di livello stazionario, dovranno essere adottati questi ultimi valori.

UNI 9916:2014 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici"

I danni agli edifici determinati dalle vibrazioni vengono trattati dalla UNI 9916 "*Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici*", norma in sostanziale accordo con i contenuti tecnici della ISO 4866 e in cui viene richiamata, sebbene non faccia parte integrante della norma, la DIN 4150, parte 3. La norma UNI 9916 fornisce una guida per la scelta di appropriati metodi di misura, di trattamento dei dati e di valutazione dei fenomeni vibratorii allo scopo di permettere anche la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica. Altro scopo della norma è di ottenere dati comparabili sulle caratteristiche delle vibrazioni rilevate in tempi diversi su uno stesso edificio, o su edifici diversi a parità di sorgente di eccitazione, nonché di fornire criteri di valutazione degli effetti delle vibrazioni medesime.

Gli edifici sono classificati secondo tre tipologie:

- costruzioni residenziali e costruzioni strutturalmente simili;

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

- costruzioni industriali e costruzioni strutturalmente simili;
- costruzioni che, per la loro sensibilità particolare alle vibrazioni, non rientrano nella classificazione delle prime due categorie o sono di grande valore intrinseco (per esempio edifici monumentali soggetti a tutela).

La Norma fornisce infine una classificazione degli effetti di danno a carico delle strutture secondo due livelli:

- *Danno di architettonico (o di soglia)*: effetto residuo delle vibrazioni che determina alterazione estetica o funzionale dell'edificio senza comprometterne la stabilità strutturale o la sicurezza degli occupanti. Il danno architettonico si presenta in molti casi con la formazione o l'accrescimento di fessure filiformi sulle superfici dei muri a secco o sulle superfici intonacate o nei giunti di malta delle costruzioni in mattoni
- *Danno maggiore*: Effetto che si presenta con la formazione di fessure più marcate, distacco e caduta di gesso o pezzi di intonaco fino al danneggiamento di elementi strutturali (per esempio fessure nei pilastri e nelle travature, apertura di giunti).

L'Appendice D della UNI 9916 contiene i criteri di accettabilità dei livelli della velocità massima con riferimento alla DIN 4150


Per velocità massima è da intendersi la velocità massima di picco (peak component particle velocity).

Per le vibrazioni di breve durata (quelle per cui sono da escludere problemi di fatica e amplificazioni dovute a risonanza nella struttura interessata), i limiti sono riportati nel seguente prospetto:

prospetto D.1 Valori di riferimento per la velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni di breve durata sulle costruzioni

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

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

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Per le vibrazioni permanenti invece i valori di riferimento sono riportati nel seguente prospetto:

prospetto D.2 Valori di riferimento per le componenti orizzontali della velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni durature sulle costruzioni

Classe	Tipo di edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s (per tutte le frequenze)
1	Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili	10
2	Edifici residenziali e costruzioni simili	5
3	Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)	2,5

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A	FOGLIO 7 di 41

2 AREA DI STUDIO

2.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

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

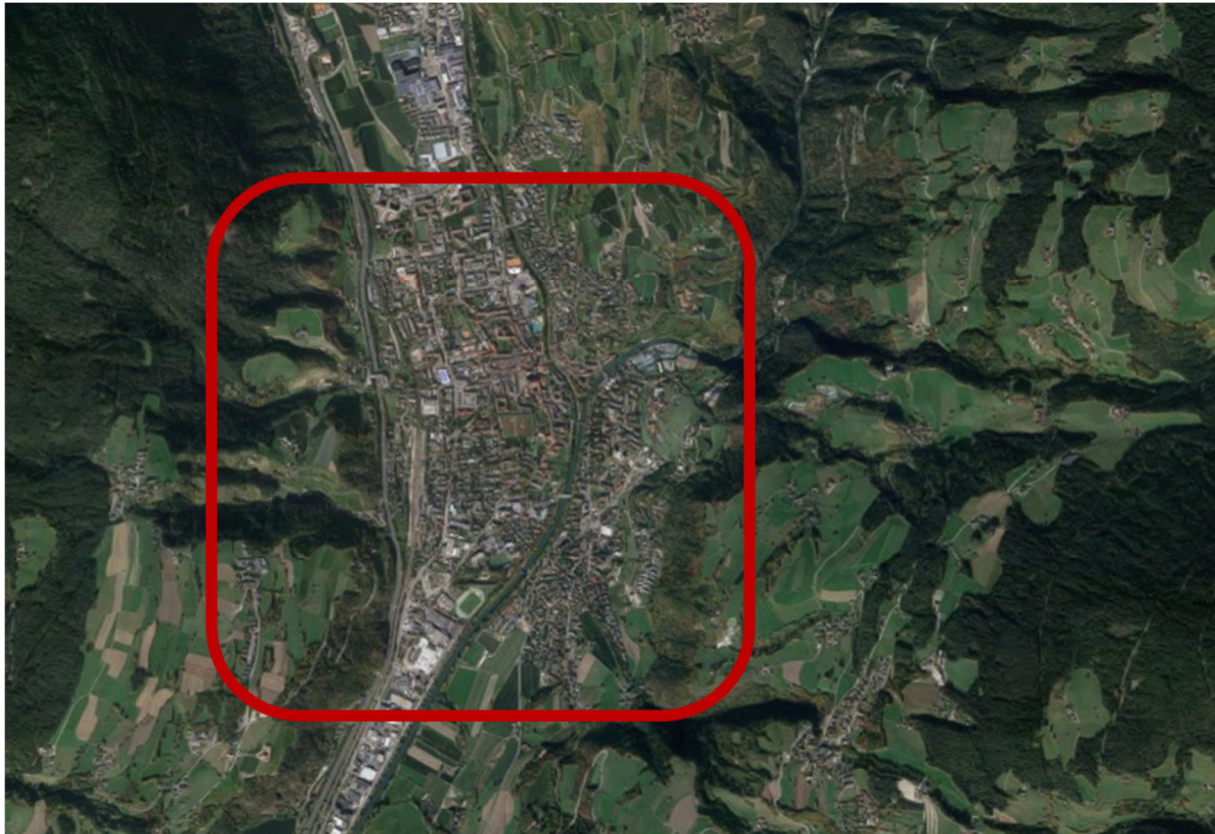


Figura 1 Vista aerea dell'inquadramento generale dell'intervento oggetto di studio

L'area di intervento ricade nel territorio del Comune di Bressanone in corrispondenza della stazione ferroviaria lungo la linea Verona Brennero ad ovest della città. L'ambito di studio è caratterizzato da un tessuto urbano con presenza di edifici residenziali, commerciali e sensibili sia sul lato orientale che occidentale della linea ferroviaria.

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A	FOGLIO 8 di 41

2.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

I dati necessari alla definizione del quadro geologico dell'area di interesse sono stati ricavati dalle analisi sviluppate nell'ambito dello studio geologico, al quale si rimanda per eventuali approfondimenti.

L'area interessata dal presente lavoro 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 corteo 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.

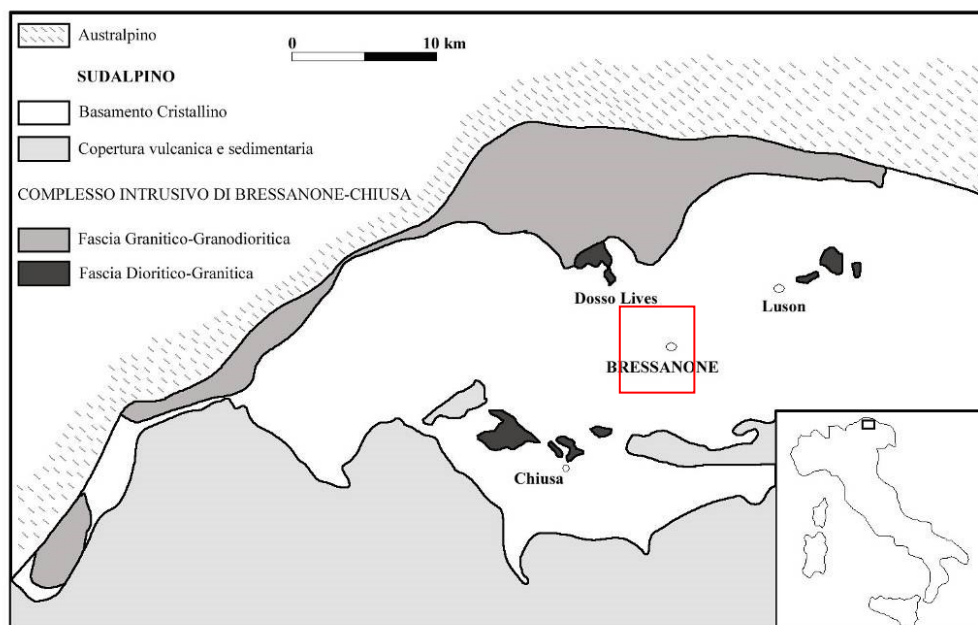


Figura 2 Schema geologico semplificato dell'area indagata (da Bargossi et alii, 1998)

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IBOI	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

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	Densità [kg/m ²]
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	Densità [kg/m ²]
Aa	Terreno prevalentemente sabbioso, con eventuale presenza di limo, ghiaia, loess	600	0,1	1600
FMA	Roccia	3500	0,01	2650
FR	"	"	"	"

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A	FOGLIO 11 di 41

3 INDAGINI VIBRAZIONALI

Lungo l'attuale linea ferroviaria Verona-Brennero è stata eseguita una campagna di rilievi vibrometrici finalizzata sia alla caratterizzazione della sorgente emissiva ferroviaria sia a determinare l'attenuazione delle onde vibrazionali nel terreno.

Nello specifico sono state posizionate tre terne accelerometriche in grado di rilevare i livelli di vibrazione lungo gli asse X, Y e Z in modo continuo per un periodo di osservazione pari a 24 ore. Le tre terne sono state posizionate perpendicolarmente alla linea ferroviaria ad una distanza di 7, 12 e 17 m dall'asse della linea in un terreno sciolto.

Questo ha 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.

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.

Nella tabella seguente si riportano i valori dei livelli di accelerazione L_w lungo gli assi X, Y e Z, riferiti sia alla condizione critica, ovvero al singolo transito che ha indotto i valori massimi di accelerazione, sia alla condizione media ricorrente. Tale analisi è stata differenziata per ciascuna tipologia di componente di traffico.

Tipologia di transito	Velocità media [km/h]	Durata media [s]	Sezione 1 – T1 (distanza da asse linea 7 m)					
			Lw max [dB]			Lw media [dB]		
			X	Y	Z	X	Y	Z
LP (EC/EN)	109,2	20,2 s	80,6	76,5	86,8	75,4	74,3	78,3
REG	100,0	15,7 s	78,6	77,3	81,9	75,7	74,3	77,7
CARGO/MERCI	84,3	36,8 s	81,2	79,9	82,5	76,3	74,5	78,5

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Tipologia di transito	Velocità media [km/h]	Durata media [s]	Sezione 1 – T2 (distanza da asse linea 12 m)					
			Lw max [dB]			Lw media [dB]		
			X	Y	Z	X	Y	Z
LP (EC/EN)	109,2	20,2 s	77,3	75,3	74,6	72,5	71,4	72,0
REG	100,0	15,7 s	77,0	75,1	74,3	72,1	70,8	72,3
CARGO/MERCI	84,3	36,8 s	77,0	76,1	75,5	73,8	72,1	72,7

Tipologia di transito	Velocità media [km/h]	Durata media [s]	Sezione 1 – T3 (distanza da asse linea 17 m)					
			Lw max [dB]			Lw media [dB]		
			X	Y	Z	X	Y	Z
LP (EC/EN)	109,2	20,2 s	68,8	69,4	69,8	66,5	67,1	68,5
REG	100,0	15,7 s	66,3	69,5	69,5	66,9	66,9	68,0
CARGO/MERCI	84,3	36,8 s	69,5	69,8	70,4	67,5	67,8	68,6

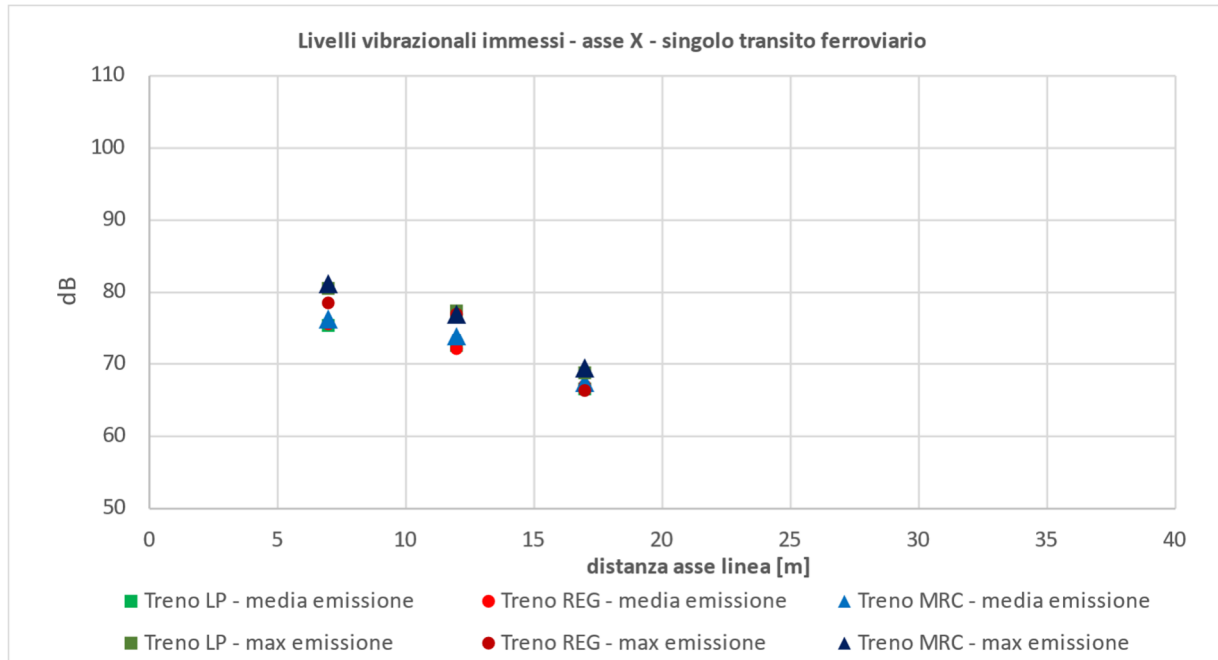


Figura 3 Livelli vibrazionali rilevati in corrispondenza della terna T1 distinti per tipologia di treno nella condizione di massima e media emissione

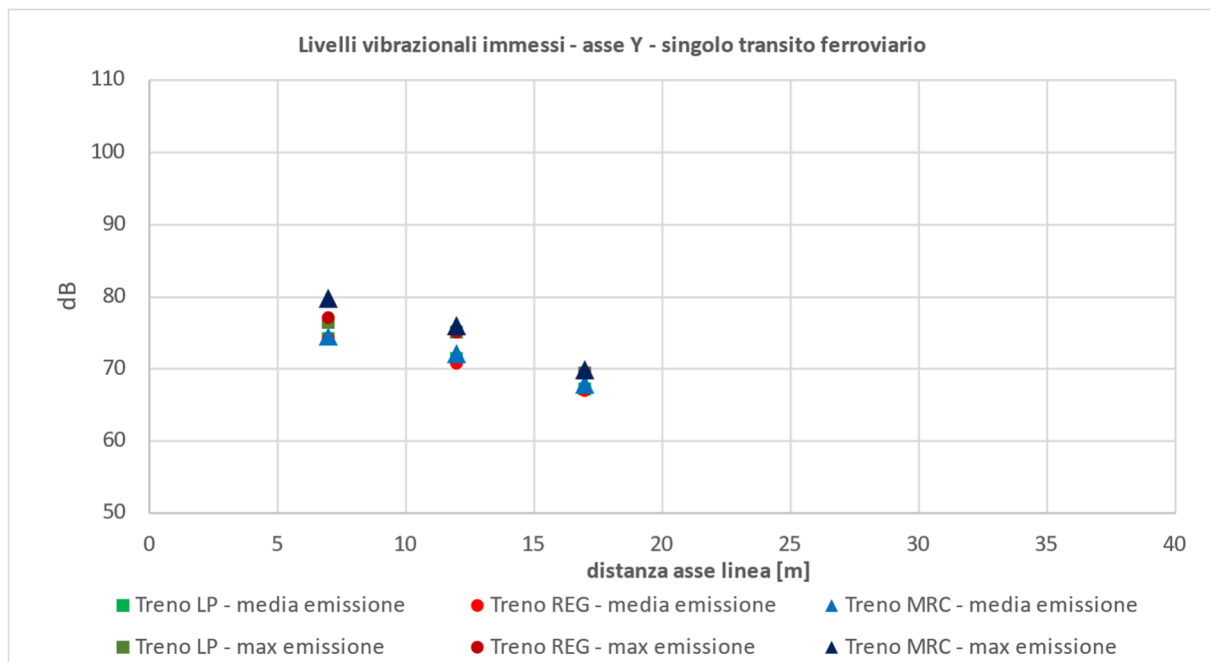


Figura 4 Livelli vibrazionali rilevati in corrispondenza della terna T2 distinti per tipologia di treno nella condizione di massima e media emissione

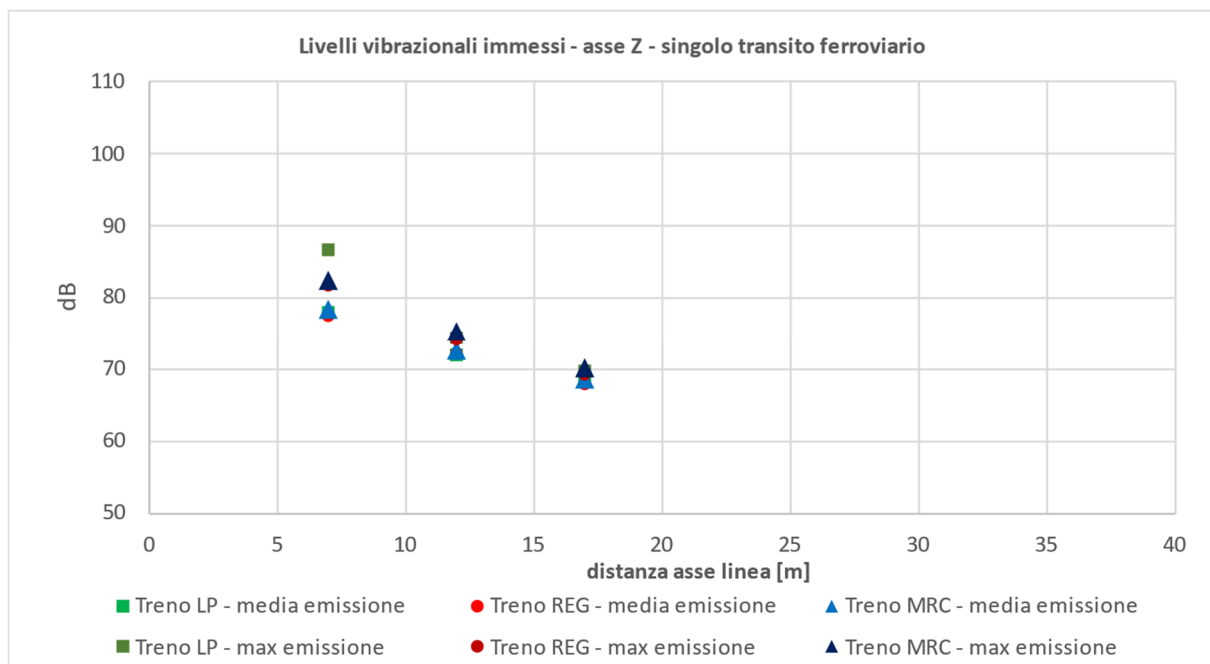


Figura 5 Livelli vibrazionali rilevati in corrispondenza della terna T3 distinti per tipologia di treno nella condizione di massima e media emissione

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A	FOGLIO 14 di 41

4 STUDIO DELL'IMPATTO DA VIBRAZIONI

4.1 LE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO

L'esercizio di una linea ferroviaria è fonte di sollecitazioni dinamiche nel terreno circostante. I treni che si muovono su un percorso ferrato eccitano i binari e il relativo sottofondo su cui essi poggiano.

Le cause di tali vibrazioni sono da ricondursi all'interazione del sistema veicolo/armamento/struttura di sostegno e dipendono da diversi fattori quali la tipologia di convoglio, le velocità di esercizio le caratteristiche dell'armamento, la tipologia di terreni e non ultimo le caratteristiche strutturali dei fabbricati.

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.

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 l'onda vibrazionale incontra un edificio, la vibrazione può essere percepita sia sotto forma di vibrazione (vibrazioni trasmesse al corpo) sia sottoforma di rumore re-irradiato (di bassa frequenza).

Tali fenomeni sono in grado di determinare effetti indesiderati sulla popolazione esposta e sugli edifici. Il disturbo sulle persone, classificato come "annoyance", dipende in misura variabile

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A	FOGLIO 15 di 41

dall'intensità e frequenza dell'evento disturbante e dal tipo di attività svolta. Le vibrazioni possono causare danni agli edifici in alcune situazioni, o in presenza di caratteristiche di estrema suscettività strutturale o di elevati e prolungati livelli di sollecitazione dinamica. Tali situazioni si verificano tuttavia in corrispondenza di livelli di vibrazione notevoli, superiori di almeno un ordine di grandezza rispetto ai livelli tipici dell'annoyance.

4.2 CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE DI VIBRAZIONI

4.2.1 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**

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

- 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 (cfr. paragrafo successivo).

Le imperfezioni superficiali della ruota e della rotaia sono la causa principale delle vibrazioni. Nel primo caso le tipiche irregolarità superficiali sono le zone lisce (piatte) della ruota per effetto della frenatura. Le irregolarità della rotaia possono essere costituite invece 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.

Oltre a quelle menzionate, altre cause di vibrazione possono essere ricondotte alla presenza di curve, alle accelerazioni e/o decelerazioni del treno, alla guida instabile dei veicoli, etc.

Le variazioni nella struttura di supporto delle rotaie dipendono dalla geometria, rigidità e spaziatura fra le traversine. Il contatto tra la traversina e il ballast incide sulla emissione vibrazionale: una traversina che può perdere il contatto con il ballast sottostante oppure essere supportata meglio dallo stesso genera una discontinuità di resistenza (minore o maggiore a seconda del caso) al passaggio del treno e quindi una differente propagazione della vibrazione nel terreno. 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%

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

“	Contributo dovuto ad asperità delle ruote	50 – 300 %
“	Contributo dovuto ad accelerazioni e frenature	5 – 20 %

4.2.2 Velocità dei treni

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:

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

dove:

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

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

4.2.3 Corpo ferroviario

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). A seconda della tipologia di corpo ferroviario la propagazione delle vibrazioni differisce notevolmente.

Nel caso di tracciati caratterizzati dalla presenza di tratti in rilevato le vibrazioni al terreno la vibrazione si propaga dalla struttura di supporto delle rotaie al terreno sottoforma di onde elastiche. Queste sono generalmente comprese tra i 20 e gli 80 Hz, con livelli di accelerazione dell'ordine di

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

60-70 dB₁, per distanze da 15 a 30 metri dalla linea ferroviaria con velocità di esercizio sino a 100 Km/h. Altresì 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.

4.3 LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO

La propagazione delle vibrazioni nel terreno è un fenomeno molto complesso da determinare in quanto strettamente dipendente dalle caratteristiche specifiche del sito di studio sulla base delle caratteristiche morfologiche, tipologiche del terreno, etc.

L'esecuzione di indagini vibrazionali sul territorio mediante installazione di tre terne accelerometriche lungo una sezione della linea ferroviaria Verona-Brennero, ha permesso una conoscenza di tipo puntuale del comportamento del terreno alla propagazione delle onde elastiche su una tratta analoga e in adiacenza a quella in progetto.

Seppur 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 a dati sperimentali specifici all'ambito di studio.

In linea generale la propagazione delle onde vibrazionali nel terreno è funzione di due principali fenomeni di attenuazione.

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

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

dove:

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

¹ 0 dB \cong 1 μ m/s²

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

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

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

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

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

Tipo di terreno	Densità [t/m ³]	Velocità di propagazione [m/s]	Fattore di perdita η
Roccia compatta	2.65	3500	0.01
Sabbia, limo, ghiaia, loess	1.6	600	0.1
Argilla, terreni argillosi	1.7	1500	0.2÷0.5

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

$$A_t = 4,34 \cdot \Omega \cdot \eta \cdot x/c \text{ con } c = (E/d)^{1/2}$$

dove:

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

- x: distanza dall'asse della linea ferroviaria
- Ω : frequenza [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
- η : coeffic. di assorbimento del terreno (fattore di perdita)
- c: velocità di propagazione dell'onda longitudinale nel terreno
- E: modulo elastico
- d: densità del terreno

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

$$A_i = 20 \cdot \log\left[\frac{1 + d_c \cdot c_c / d_a \cdot c_a}{2}\right]$$

dove:

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

In considerazione dei molteplici fattori che possono condizionare il trasferimento delle vibrazioni nel suolo, per la costruzione del modello sono stati utilizzati i dati sperimentali rilevati dalla campagna di rilievi già citata considerando la media dei livelli medi e massimi di ciascuna tipologia di convoglio per ciascun asse di riferimento. Si nota che, conoscendo la mutua distanza tra le postazioni, dai dati sperimentali è possibile estrapolare le funzioni di attenuazione, tramite regressione, le quali descrivono la propagazione nel terreno dell'onda vibrazionale in funzione della distanza. Nei grafici seguenti sono riportati i valori sperimentali sui quali è applicata la regressione logaritmica al fine di definire le diverse funzioni di trasferimento che saranno applicate successivamente nelle analisi previsionali.

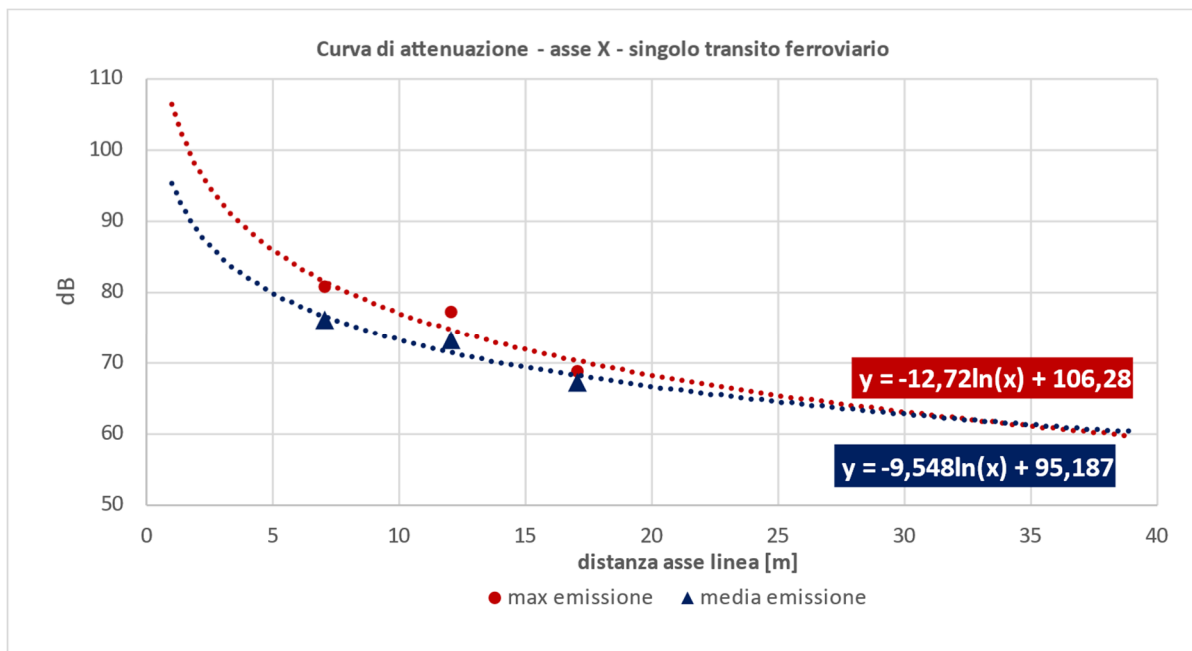


Figura 6 Curve e funzioni di attenuazione lungo l'asse X del singolo evento transito nella condizione di emissione massima e media

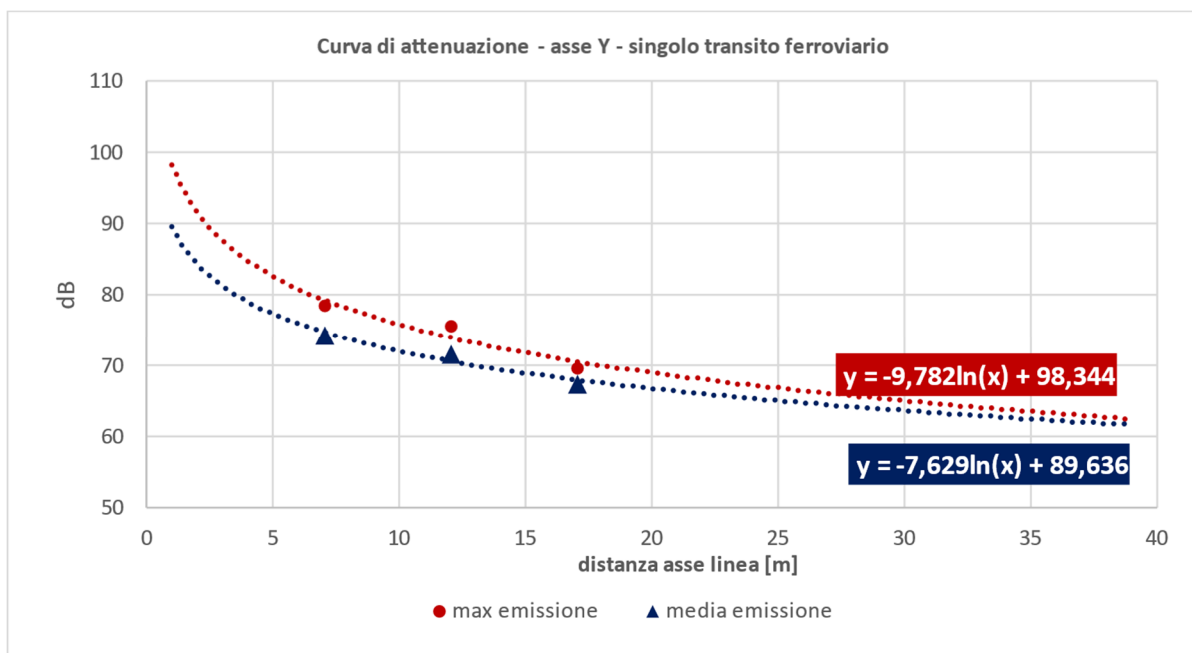


Figura 7 Curve e funzioni di attenuazione lungo l'asse Y del singolo evento transito nella condizione di emissione massima e media

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

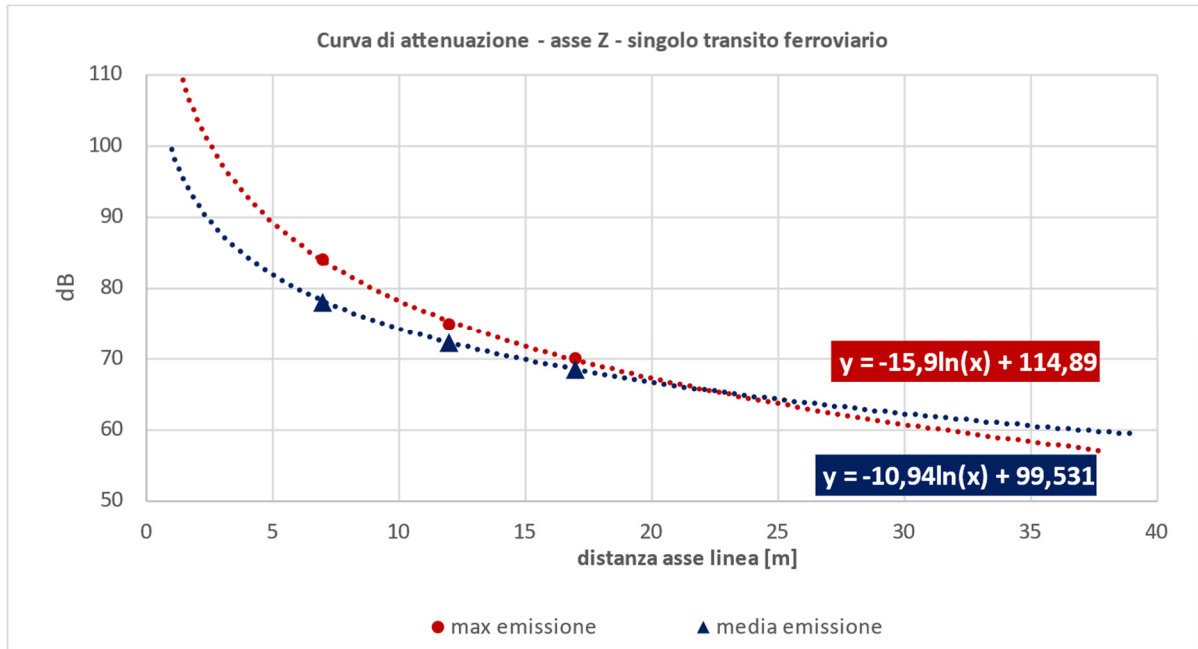


Figura 8 Curve e funzioni di attenuazione lungo l'asse Z del singolo evento transito nella condizione di emissione massima e media

4.4 LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NELLE STRUTTURE EDILIZIE

4.4.1 Risposta degli edifici alle vibrazioni

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). Quando invece 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. Queste 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.

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

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Fattore correttivo	Motivazione	Modalità di correzione
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 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.

4.4.2 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).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

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.

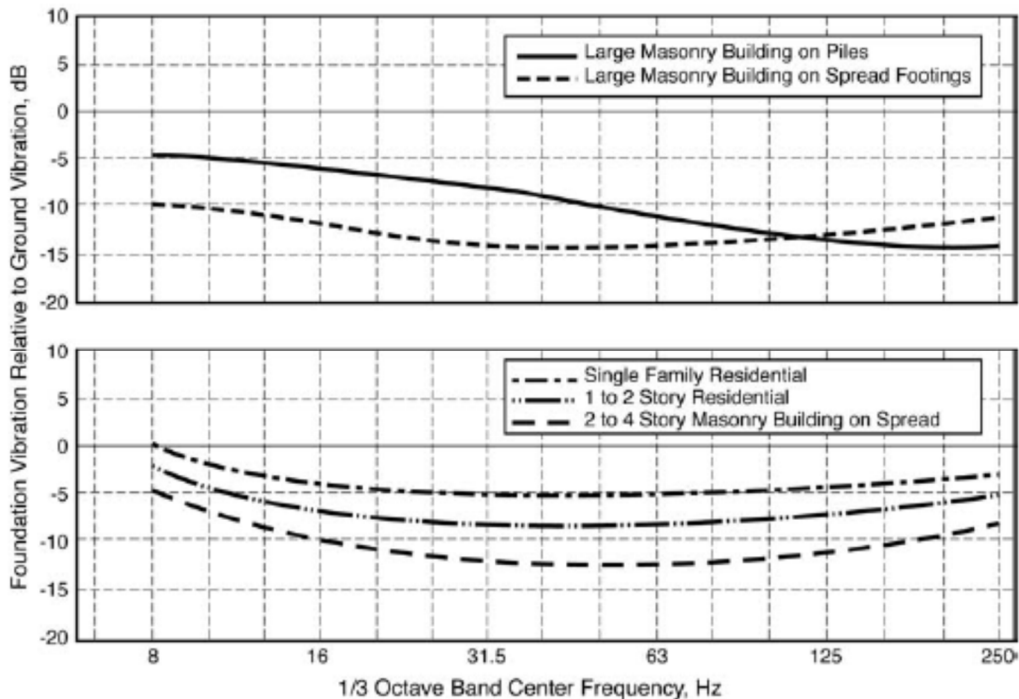


Figura 9 Risposta delle fondazioni per diverse tipologie di edifici (Fonte: FTA, USA)

4.4.3 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.

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IBOI	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

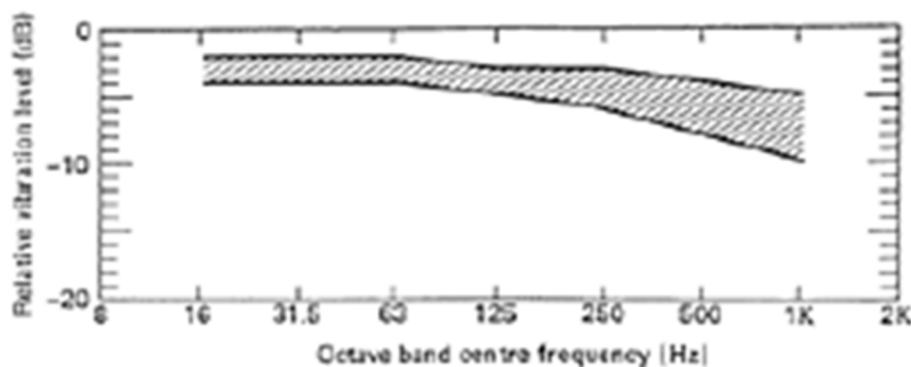


Figura 10 Attenuazione delle vibrazioni nel passaggio da un piano al successivo

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;
- 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.

4.4.4 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.

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IBOI	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Elemento edilizio	Frequenza naturale [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.

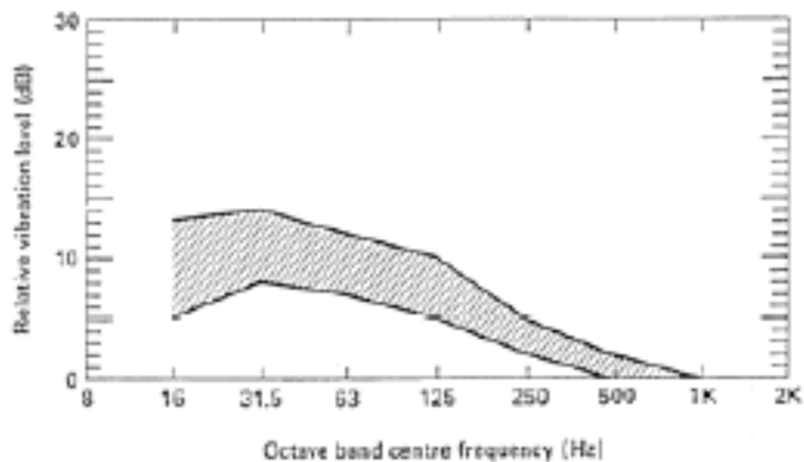


Figura 11 Amplificazione prodotta dai solai

Ne deriva 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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

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

Tipologia fondazioni	Tipologia edificio	Fattore correttivo [dB]
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.

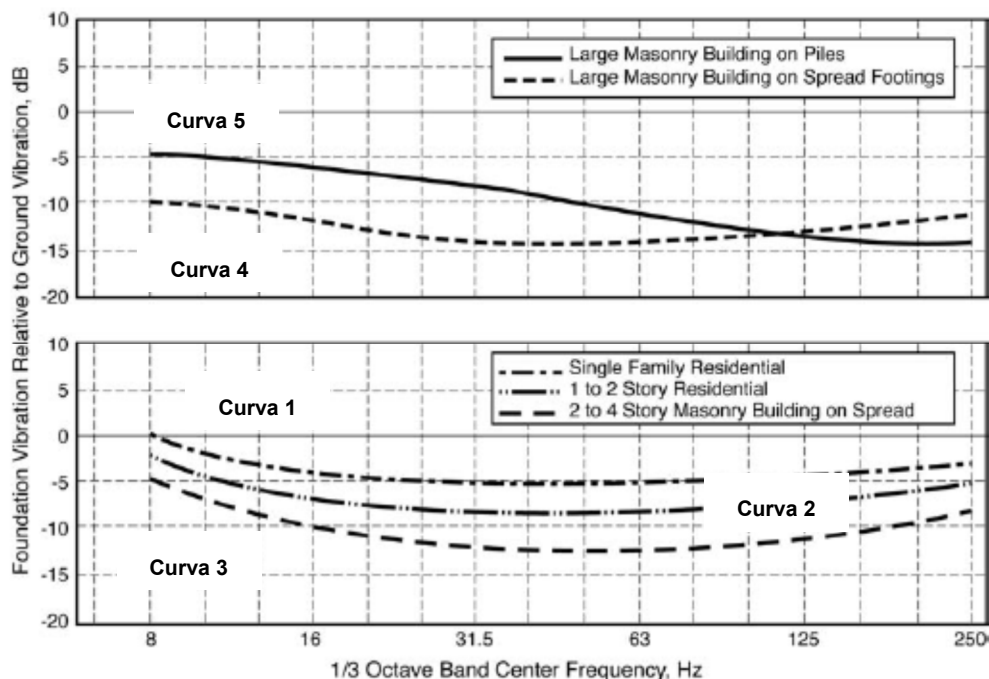


Figura 12 Fattori correttivi dovuti alla tipologia di fondazione

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Le tipologie edilizie prevalenti in adiacenza al tracciato sono rappresentate da edifici storici in muratura, con fondazioni direttamente immorsate nel terreno e edifici di recente edificazione con ossatura in cemento armato e fondazioni continue con altezza che può raggiungere anche 8 piani.

In queste condizioni, sulla base di quanto sin ora detto, la differenza tra il livello di vibrazione del terreno e quello dell'edificio si stima cautelativamente essere di circa +5dB. Tale fattore costituisce un ulteriore elemento cautelativo nella valutazione del disturbo da vibrazioni e tengono conto dell'effetto combinato delle componenti positive, quali la perdita di accoppiamento suolo-fondazioni e l'attenuazione da piano a piano e delle componenti negative di attenuazione, quali la risonanza alle frequenze proprie dei solai.

L'approccio cautelativo con cui viene affrontato il tema è confermato anche da indagini effettuate sulle linee ferroviarie italiane.

4.4.6 Rumore trasmesso per via solida dalle strutture

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

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

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

dove:

- L_p è il livello di pressione sonora in dB (0 dB = 20 μ Pa);
- L_a è il livello di vibrazione di accelerazione all'orizzontamento in dB (0 dB = 1 μ g);
- F è la frequenza per bande a terzi di ottava in Hz.

L'applicazione del modello di propagazione del rumore solido per i ricettori analizzati nel presente studio non evidenziano situazioni di criticità preventivabili. Lo stato degli infissi di ciascun edificio, classificato "buono" in fase di censimento ricettori, potrebbe ridurre notevolmente l'insorgere di condizioni di attenzione per gli stessi ricettori potenzialmente interessati da livelli di vibrazioni

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p align="center">LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE</p> <p align="center">PROGETTO DEFINITIVO</p>					
<p>STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale</p>	<p>COMMESSA IB01</p>	<p>LOTTO 00 D 22</p>	<p>CODIFICA RG</p>	<p>DOCUMENTO IM0004 002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 30 di 41</p>

disturbanti, qualora i vetri entrino in risonanza, vibrino ed emettano all'interno del locale un rumore avente le medesime frequenze.

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

5 LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO

5.1 PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO

L'individuazione delle criticità che si potranno verificare con la realizzazione del progetto ha reso indispensabile determinare preventivamente i criteri di valutazione della sensibilità del territorio: a tale scopo è stato utilizzato come riferimento il censimento dei ricettori eseguito nell'ambito dello studio acustico. Per quanto riguarda l'individuazione di criticità si è fatto riferimento ai valori indicati dalla norma ISO 2631/UNI 9614:1990 a seconda della condizione operativa presa a riferimento. Le analisi previsionali di verifica del disturbo da vibrazioni all'interno degli edifici si sviluppano considerando due differenti scenari operativi: il primo di massima esposizione rappresentato dal transito di un singolo convoglio ferroviario nella condizione di massima emissione, il secondo invece di esposizione complessiva considerando l'intero modello di esercizio previsto per la linea ferroviaria di progetto rapportando il livello di vibrazione indotto all'intero periodo diurno e notturno. Considerando quanto indicato dalla norma ISO 2631/UNI 9614:1990 in termini di valori limite di riferimento per la valutazione del disturbo da vibrazioni, si è fatto riferimento alla condizione di postura del corpo non nota, per la quale nel primo caso si fa riferimento ai valori suggeriti per i transiti ferroviari (86,7 dB), nel secondo caso invece ai valori indicati per le vibrazioni di livello costante (77 dB per il giorno e 74 dB per la notte). Applicando i modelli di calcoli precedentemente descritti, le funzioni di trasferimento sperimentali e attraversamenti litologici tipici dell'area in esame, i dati di caratterizzazione dei singoli transiti massimi e medi e tipologie edilizie sia in c.a. sia in muratura (con luci di solaio di 4 m), si è giunti al calcolo della distanza dalla sorgente a cui il livello di accelerazione ponderato risulta inferiore ai valori indicati dalla norma UNI 9614:1990 per i ricettori residenziali sia nel periodo diurno che notturno lungo tutti gli assi. In assenza però di dati precisi per ciascun edificio analizzato (terreno, fondazioni, strutture) le valutazioni previsionali possono risentire di variazioni anche apprezzabili: a tal fine, nelle valutazioni conclusive si terrà conto in via cautelativa di un margine di tolleranza tale da rappresentare anche la variabilità dei parametri di input.

5.2 TRAFFICO DI ESERCIZIO

Il numero di transiti considerati per la valutazione previsionale del disturbo da vibrazioni si basa sul modello di esercizio futuro individuato nell'ambito del progetto e riferito alla linea Verona-Brennero in corrispondenza della stazione di Bressanone. Per quanto riguarda le velocità di percorrenza si fa riferimento a quanto previsto allo stato attuale per la linea Verona-Brennero nella tratta ricadente all'interno dell'ambito di studio. Nello specifico:

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

- Rango A (treni merci): 100 km/h;
- Rango B (treni regionali): 105 km/h;
- Rango C (treni LP EC/EN): 110 km/h

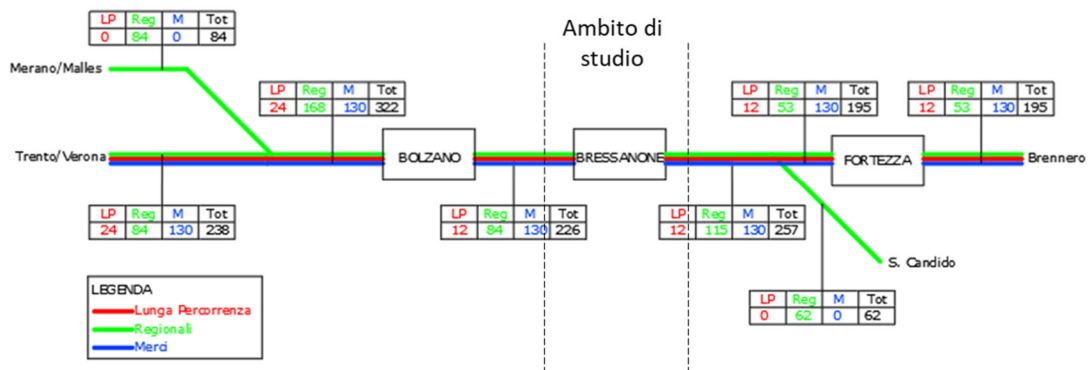


Figura 13 Modello di esercizio linea Verona-Brennero in corrispondenza della stazione di Bressanone

Linea Verona-Brennero (sud stazione Bressanone)	REGIONALI		MERCİ		LP (EC/EN)		TOTALE	
	D	N	D	N	D	N	tot D	tot N
Scenario di riferimento di esercizio di progetto								
TI ETR 170 (6 carrozze)	34	1	-	-	-	-	34	1
TI E464 + 6 carrozze	32	17	-	-	-	-	32	17
EC Trenord E190 + 10 carrozze (L.280 m)	-	-	-	-	11	1	11	1
Merci ^(*)	-	-	75	55	-	-	75	55
Totale	66	18	75	55	11	1	152	74
Linea Verona-Brennero (nord stazione Bressanone)	REGIONALI		MERCİ		LP (EC/EN)		TOTALE	
	D	N	D	N	D	N	tot D	tot N
Scenario di riferimento di esercizio di progetto								
TI ETR 170 (6 carrozze)	59	3	-	-	-	-	59	3
TI E464 + 6 carrozze	34	19	-	-	-	-	34	19
EC Trenord E190 + 10 carrozze (L.280 m)	-	-	-	-	11	1	11	1
Merci ^(*)	-	-	75	55	-	-	75	55
Totale	93	22	75	55	11	1	179	78

^(*) composizioni circolanti di peso maggiore: 2 E412 + 1300t; 2 E189 + 1250t; 2 EU43 + 1581t; 2 E193 + 1066t

Tabella 5-1 Traffico di esercizio linea Verona-Brennero in ingresso da nord alla stazione di Bressanone

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A	FOGLIO 33 di 41

5.3 LIVELLI COMPLESSIVI

5.3.1 Individuazione dei livelli di vibrazione

Le accelerazioni complessivamente prodotte dall'esercizio della linea ferroviaria di progetto sono fornite dall'applicazione dell'emissione delle singole tipologie di treno e verso di percorrenza al traffico di esercizio previsto, in riferimento alle postazioni di indagine effettuate e tenendo conto del tempo di esposizione medio per tipologia di treno. Nelle tabelle seguenti si evincono per i tre assi di riferimento X, Y e Z e nelle tre postazioni T1, T2 e T3 di riferimento il valore complessivo di esposizione nel periodo diurno e nel periodo notturno calcolato sulla base del modello di esercizio atteso. Il calcolo è stato effettuato per ciascuna sezione di studio individuata precedentemente in relazione al layout della rete ferroviaria, del numero e tipologia di transiti per singola tratta, della velocità di percorrenza e della possibile presenza di fenomeni di sovrapposizione degli effetti con le due linee storiche di raccordo. Inoltre è stato considerato un fattore di correzione per tener conto della differenza tra il livello vibrazionale nel terreno e quello all'interno dell'edificio che, nel caso specifico per le motivazioni dette nel capitolo precedente si stima essere cautelativamente di +5 dB. La valutazione è eseguita sia considerando il singolo transito nella condizione di massima emissione vibrazionale che l'intero modello di esercizio nell'arco delle 24 ore, differenziando le analisi tra periodo diurno e notturno, e considerando, in quest'ultimo caso, i valori emissivi medi per ciascuna tipologia di convoglio. Per la condizione di massima emissione si è fatto riferimento alla tipologia di convoglio ferroviario merci con una velocità di percorrenza massima di 100 km/h (pari a quella di progetto della linea ferroviaria).

5.3.2 Livello di emissione massima

Considerando la tipologia di traffico, il livello di emissione massima è rappresentato dai valori vibrazionali associati al transito di un convoglio merci opportunamente corretti rispetto ai valori riportati nel par. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** secondo i fattori di correzione associati alla velocità di percorrenza massima (100 km/h) e alla trasmissione all'interno delle strutture.

Rispetto quindi a tale condizione è stata verificato il livello di emissione massima lungo la linea del Brennero sia sul tratto in ingresso da sud alla stazione di Bressanone che sul tratto in ingresso da nord. Per entrambe le tratte ferroviarie infatti tale condizione costituisce quella maggiormente critica.

Per quanto concerne invece i valori di riferimento assunti per valutare l'entità del disturbo da vibrazioni all'interno degli edifici, in questo caso si è fatto riferimento a quanto indicato dalla norma

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

UNI9614:1990 al punto A.4 in Appendice dove vengono indicati come limiti di riferimento per la sorgente ferroviaria di 89,5 dB per l'asse X e 86,7 dB per gli assi X e y.

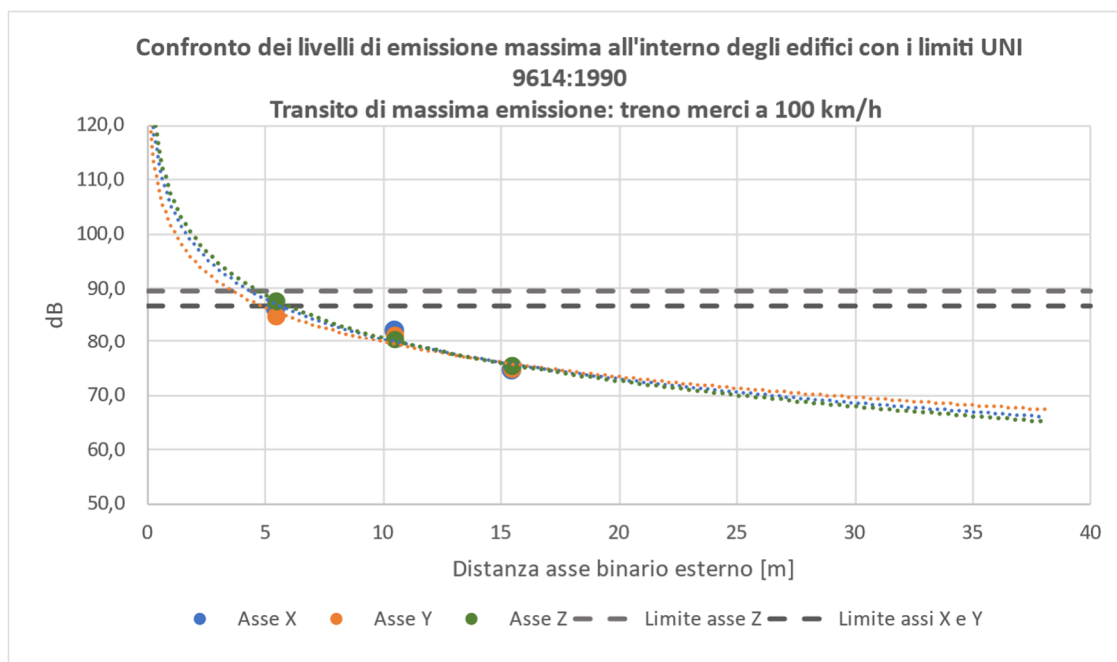


Figura 14 Confronto dei livelli di emissione massima con i limiti indicati dalla UNI 9614:1990 in funzione della distanza dall'asse del binario più esterno
 MASSIMO TRANSITO – TRENO MERCI 100 km/h

Considerando quindi come transito di massima emissione un convoglio merci alla velocità di 100 km/h dall'applicazione del modello previsionale individuato, e la condizione di postura non nota, si evince come il livello più restrittivo di 86,7 dB viene raggiunto ad una distanza di circa 5-6 m dall'asse del binario più esterno.

5.3.3 Livello di emissione complessivo

Per la determinazione dei livelli di emissione complessivi si è fatto riferimento invece all'intero modello di esercizio previsto nell'arco delle 24 ore, distinguendo il numero di transiti nel periodo diurno e notturno, e considerando i valori emissivi medi per ciascuna tipologia di convoglio desunti dall'analisi dei dati sperimentali rilevati dalle indagini sul campo.

In virtù del modello di esercizio che individua volumi di traffico differenti per la tratta a sud della stazione di Bressanone e per quella a nord, in questo caso le analisi sono state differenziate nei seguenti due scenari.

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Scenario 1 – Linea del Brennero – Ingresso da sud alla stazione di Bressanone

In questo caso quindi le analisi previsionali tengono conto di:

- 85 treni regionali alla velocità di 105 km/h di cui 70 nel periodo diurno e 15 treni nel periodo notturno;
- 130 treni merci alla velocità di 100 km/h di cui 75 nel periodo diurno e 55 treni nel periodo notturno;
- 12 treni di lunga percorrenza alla velocità di 110 km/h di cui 11 nel periodo diurno e 1 nel periodo notturno.

Anche in questo caso si è proceduto ad applicare dei fattori di correzione cautelativi secondo la velocità di transito prevista da progetto e l'accoppiamento fondazioni-terreno con la possibile amplificazione dei livelli vibrazionali all'interno degli edifici. A riguardo di quest'ultimo aspetto si evidenzia nuovamente come sia stato considerato un fattore cautelativo di correzione dei livelli vibrazionali di +5dB.

Posizione	Dist. da binario est.	Lw,eq [dB] Diurno			Lw,eq [dB] Notturno		
		Asse Z	Asse X	Asse Y	Asse Z	Asse X	Asse Y
T1	5,5 m	65,2	63,6	67,4	64,9	63,2	67,1
T2	10,5 m	62,4	60,8	61,7	62,3	60,6	61,3
T3	15,5 m	56,4	56,6	57,6	56,1	56,4	57,2

Tabella 5-2 Livelli di accelerazione Lw,eq in dB nel periodo diurno e notturno lungo gli assi X, Y e Z complessivamente attesi secondo il programma di esercizio previsto nel tratto a sud della stazione di Bressanone considerando i valori emissivi medi

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IBOI	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A	FOGLIO 36 di 41

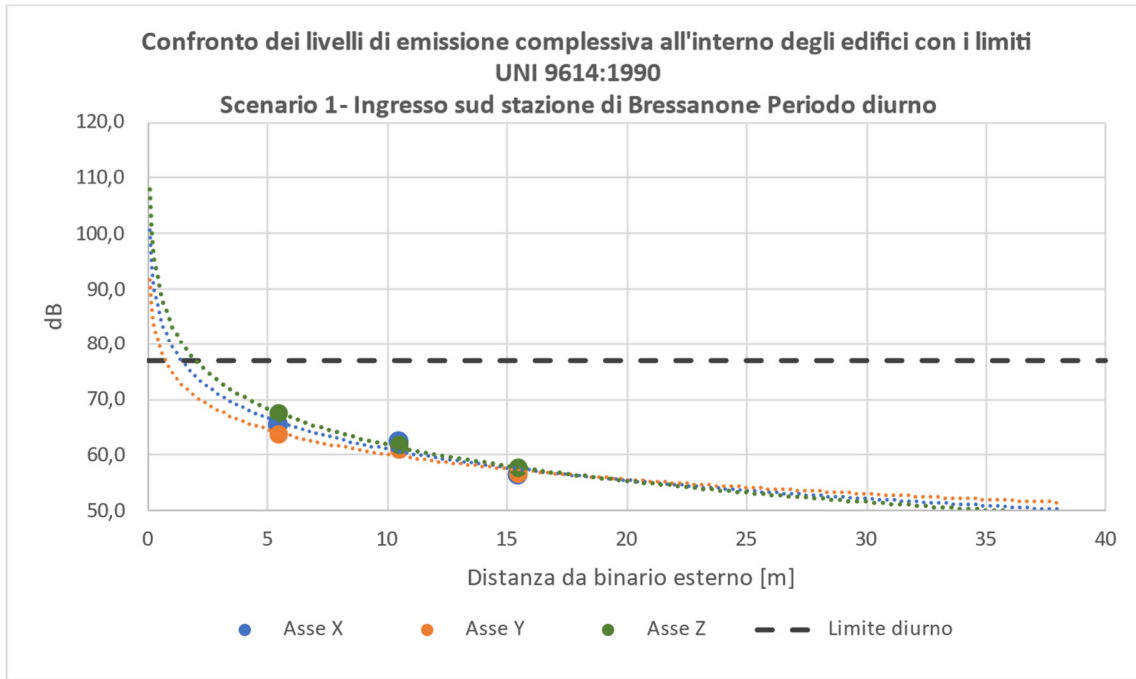


Figura 15 Confronto dei livelli di emissione complessiva con i limiti UNI 9614:1990 in funzione della distanza dal binario secondo il modello di esercizio previsto– Scenario 1, ingresso sud stazione di Bressanone – Periodo diurno

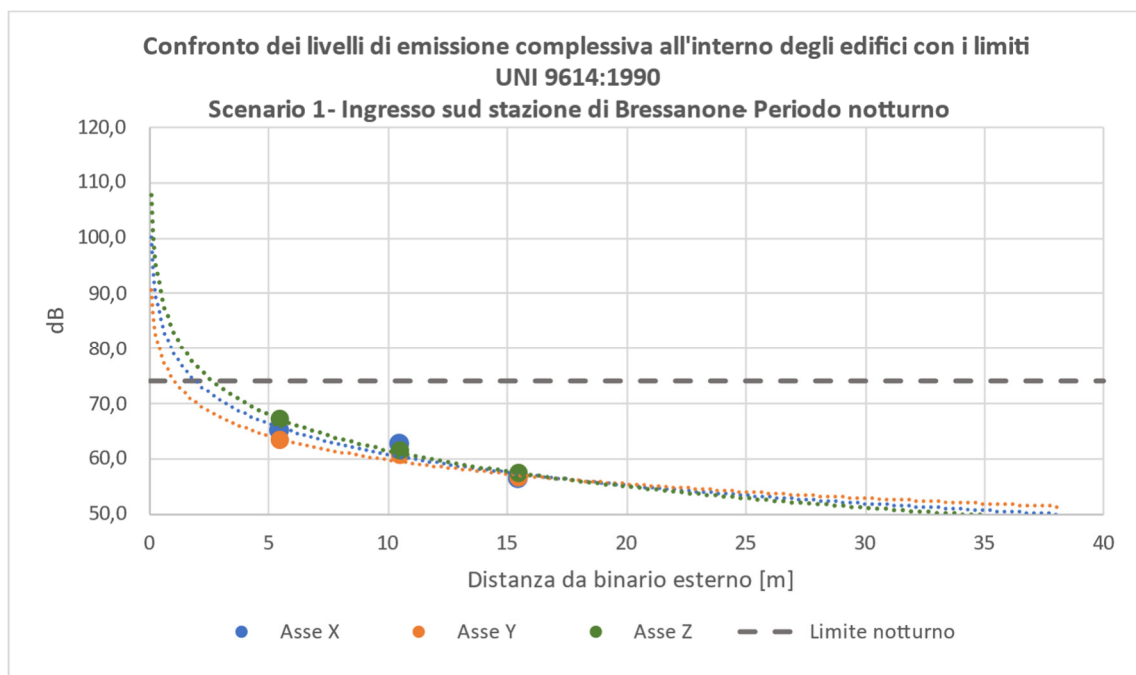


Figura 16 Confronto dei livelli di emissione complessiva con i limiti UNI 9614:1990 in funzione della distanza dal binario secondo il modello di esercizio previsto – Scenario 1, ingresso sud stazione di Bressanone - Periodo notturno

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IBOI	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Secondo quindi il modello previsionale assunto nel caso specifico, l'intero contributo emissivo indotto dalla sorgente ferroviaria rapportato ai due periodi temporali di riferimento (diurno e notturno) sia tale per cui già a partire dai 3-4 metri dall'asse del binario più esterno sia al di sotto dei valori limite di riferimento indicati dalla UNI 9614:1990 per gli edifici residenziali.

Scenario 2 – Linea del Brennero – Ingresso da nord alla stazione di Bressanone

In questo caso quindi le analisi previsionali tengono conto di:

- 115 treni regionali alla velocità di 105 km/h di cui 93 nel periodo diurno e 22 treni nel periodo notturno;
- 130 treni merci alla velocità di 100 km/h di cui 75 nel periodo diurno e 55 treni nel periodo notturno;
- 12 treni di lunga percorrenza alla velocità di 110 km/h di cui 11 nel periodo diurno e 1 nel periodo notturno.

Anche in questo caso si è proceduto ad applicare dei fattori di correzione secondo la velocità di transito prevista e l'accoppiamento terreno-fondazioni con la potenziale amplificazione del livello di vibrazione all'interno degli edifici.

Posizione	Dist. da binario est.	Lw,eq [dB] Diurno			Lw,eq [dB] Notturno		
		Asse Z	Asse X	Asse Y	Asse Z	Asse X	Asse Y
T1	5,5 m	64,8	63,2	67,0	64,8	63,1	67,0
T2	10,5 m	62,1	60,5	61,3	62,2	60,5	61,2
T3	15,5 m	56,0	56,3	57,2	56,0	56,3	57,1

Tabella 5-3 Livelli di accelerazione Lw,eq in dB nel periodo diurno e notturno lungo gli assi X, Y e Z complessivamente attesi secondo il programma di esercizio previsto nel tratto a nord della stazione di Bressanone considerando i valori emissivi medi

Come si evince dai grafici, anche in questo caso secondo il modello previsionale assunto, l'intero contributo emissivo indotto dalla sorgente ferroviaria rapportato ai due periodi temporali di riferimento (diurno e notturno) sia tale per cui già a partire dai 3-4 metri dall'asse del binario più esterno sia al di sotto dei valori limite di riferimento indicati dalla UNI 9614:1990 per gli edifici residenziali.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

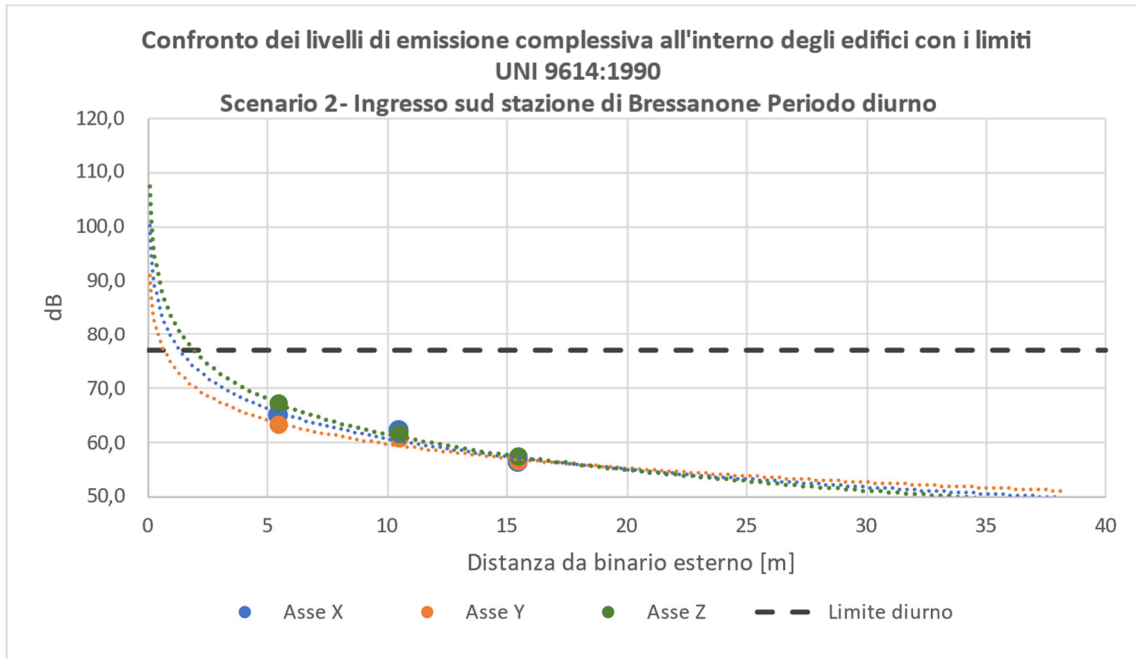


Figura 17 Confronto dei livelli di emissione complessiva con i limiti UNI 9614:1990 in funzione della distanza dal binario secondo il modello di esercizio previsto– Scenario 2, ingresso nord stazione di Bressanone – Periodo diurno

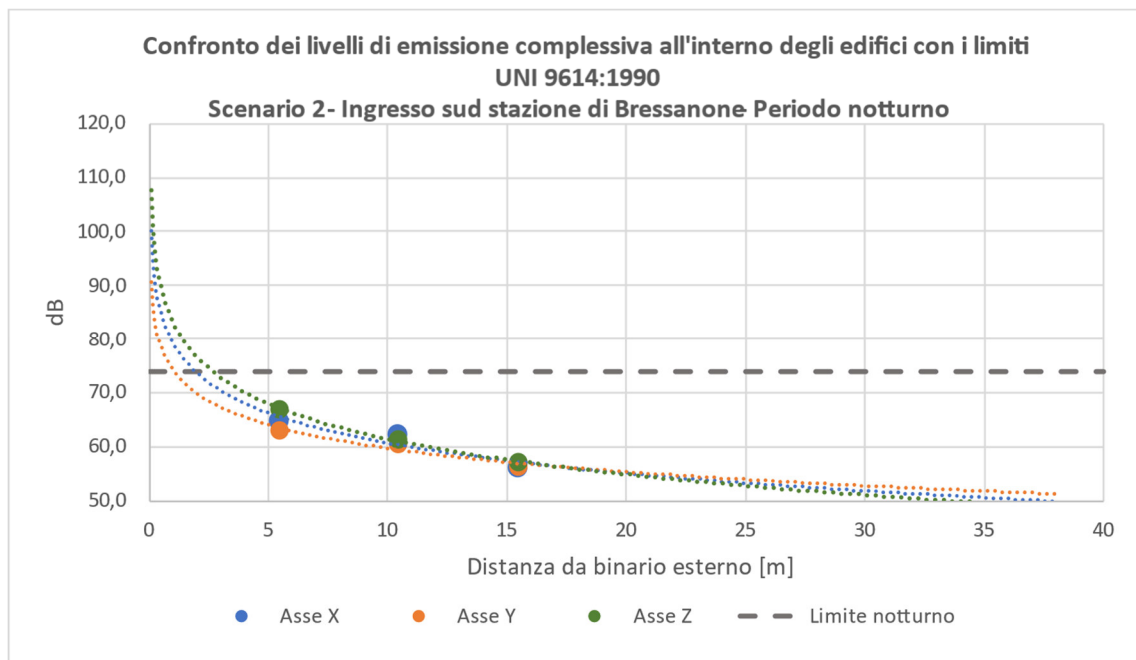


Figura 18 Confronto dei livelli di emissione complessiva con i limiti UNI 9614:1990 in funzione della distanza dal binario secondo il modello di esercizio previsto – Scenario 1, ingresso nord stazione di Bressanone - Periodo notturno

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

5.4 INDIVIDUAZIONE DELLE POTENZIALI AREE CRITICHE

La determinazione dei livelli equivalenti delle accelerazioni calcolate secondo il modello di esercizio futuro della linea ferroviaria oggetto di studio e riferiti al periodo diurno e notturno secondo quanto previsto dalla UNI 9614:1990, ha permesso di individuare le aree potenzialmente critiche sulla scorta del confronto con i valori indicati dalla norma UNI come riferimento per la valutazione del disturbo.

In merito alla condizione di massima emissione, sulla base di quanto esposto in precedenza questa è rappresentata dal singolo transito di un convoglio merci alla velocità di 100 km/h. Dall'applicazione dell'algoritmo di calcolo si evince come l'area di potenziale disturbo sia costituita da una fascia di 6 metri dall'asse del binario più esterno. Dalla planimetria del censimento ricettori dello studio acustico (rif. IB0100D22P6IM0004001A e IB0100D22P6IM0004002A) si evince una condizione di rispetto per tutti i ricettori non essendo presenti edifici residenziali posti ad una distanza inferiore ai 6 metri dal binario più esterno.

Dall'analisi sul territorio si evince come in corrispondenza di tali ricettori il corpo ferroviario è su muro. Le misure sono state eseguite in corrispondenza di un tratto ferroviario a raso data la disponibilità di accesso dei luoghi, ovvero in una condizione più gravosa non essendo presenti elementi del corpo ferroviario che attenuino l'emissione vibrazionale nel terreno. E' presumibile ritenere quindi come date le caratteristiche del corpo ferroviario in corrispondenza dei suddetti edifici i livelli vibrazionali indotti nella condizione di massima emissione possano essere attenuati per effetto della presenza del rilevato in muro e quindi inferiori a quelli limite.

Ciò nonostante, tali condizioni di criticità si eliminano nel momento in cui si tiene conto dell'intero contributo emissivo associato al modello di esercizio previsto rapportato all'intero periodo diurno e notturno. Tenendo conto infatti del numero complessivo di transiti ferroviari previsti secondo i valori emissivi medi riscontrati nelle indagini sperimentali distinti per tipologia di treno e rapportando i livelli di accelerazione complessiva all'intero periodo diurno e notturno, dall'applicazione del modello previsionale non si individuano infatti condizioni di criticità e quindi aree potenzialmente oggetto di disturbo da vibrazioni indotte dal traffico ferroviario lungo la linea del Brennero. Sulla base di quanto detto quindi non sono state individuate tratte critiche.

	<p style="text-align: center;">LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE</p> <p style="text-align: center;">PROGETTO DEFINITIVO</p>					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IB01	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

6 CONCLUSIONI


Il presente studio ha avuto come scopo l'individuazione delle problematiche di propagazione delle vibrazioni indotte dal traffico ferroviario lungo la linea del Brennero nell'ambito del progetto di adeguamento del Piano regolatore di gestione della stazione di Bressanone.

La verifica dei livelli vibrazionali indotti è stata eseguita rispetto ai valori assunti come riferimento per la valutazione del disturbo in corrispondenza degli edifici così come individuati dalla norma UNI 9614:1990 "*Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo*". Nello specifico le valutazioni hanno tenuto conto sia dello scenario di massimo disturbo associate al transito di un singolo convoglio ferroviario in condizioni di massima emissione sia dello scenario complessivo associato all'intero modello di esercizio nelle condizioni di emissioni medie nell'intero periodo diurno e notturno individuato dalla normativa di riferimento.

Il modello previsionale assunto per la stima dei livelli di accelerazione in corrispondenza della ferrovia si basa sull'individuazione di una legge di propagazione tarata in funzione di indagini sperimentali eseguite in situ lungo la linea storica. Dall'analisi dei dati di accelerazione rilevati nel periodo di misura sono stati individuati i livelli di accelerazione in dB associati sia alla condizione di massima emissione indotta dal singolo transito sia alla condizione di media emissione dall'analisi statistica dell'intero numero di convogli campionati. Inoltre dai livelli di accelerazione rilevati nelle due postazioni di misura è stata determinata la legge di propagazione delle onde vibrazionali nel terreno specifica al contesto territoriale in studio. Inoltre in riferimento alla valutazione interna degli edifici è stato considerato cautelativamente un incremento dei livelli di emissione di +5 dB per tener conto della possibile amplificazione delle vibrazioni data dall'accoppiamento fondazioni-terreno e dalla tipologia di struttura dell'edificio.

L'algoritmo di calcolo così definito è stato quindi applicato al modello di esercizio previsto per l'individuazione delle aree critiche, ovvero per i ricettori cui si stima un livello di accelerazione superiore a quello di riferimento previsto dalla norma UNI 9614:1990 a seconda se si considera la condizione di singolo transito (massima emissione) o complessiva secondo l'intero modello di esercizio previsto per la linea Verona-Brennero. In entrambi i casi facendo riferimento alla condizione di postura non nota si considerano esclusivamente i valori di riferimento più restrittivi. Nel primo caso quindi si fa riferimento ai valori limite indicati dalla norma UNI 9614:1990 all'appendice A per la sorgente ferroviaria, ovvero di 86,7 dB, nel secondo caso, invece, si fa riferimento ai valori di riferimento per il periodo diurno (77 dB) e notturno (74 dB).

La verifica è stata effettuata sia per lo scenario di massimo disturbo, ovvero per il periodo temporale limitato al transito del convoglio ferroviario critico, sia per lo scenario complessivo riferito all'intero modello di esercizio nell'arco temporale costituente il periodo diurno e notturno secondo la suddetta norma UNI.

	LINEA VERONA-BRENNERO E LINEA FORTEZZA-SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO "VARIANTE VAL DI RIGA" ADEGUAMENTO PRG DI BRESSANONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA IBOI	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Nella prima condizione, le analisi previsionali hanno evidenziato una condizione di rispetto per tutti gli edifici residenziali con livelli vibrazionali indotti inferiori ai valori di riferimento legati al transito di un singolo convoglio (86,7 dB, valore più restrittivo considerando la condizione di postura non nota).

Nello studio è stata poi considerata anche la condizione di disturbo complessivo determinando i livelli di accelerazione indotti dal modello di esercizio previsto e riferiti all'intero periodo temporale diurno e notturno. In tale condizione considerando i valori di emissione media determinati dall'analisi statistica dei campionamenti effettuati, emerge una condizione di pieno rispetto dei valori di accelerazione in corrispondenza degli edifici residenziali ubicati lungo la linea ferroviaria. In termini quindi complessivi non sono state quindi individuate tratte critiche sia per il periodo diurno che notturno.

Ad ulteriore conferma di quanto individuato sulla base di un modello previsionale basato su indagini in situ, si evidenzia inoltre come le caratteristiche del corpo ferroviario (rilevato in muro) in corrispondenza dei ricettori residenziali più vicini all'infrastruttura ferroviaria all'interno dell'abitato di Bressanone, sono tali da attenuare ulteriormente i livelli vibrazionali. Il modello sperimentale adottato per la analisi previsionali è stato implementato sulla scorta di misure in un tratto della linea a raso, ovvero in una condizione emissiva della linea ferroviaria più gravosa in quanto assente di fattori di attenuazione propri dei corpi ferroviari in rilevato. E' presumibile ritenere quindi come le vibrazioni indotte dal traffico ferroviario in corrispondenza di tali ricettori possano essere inferiori rispetto a quelle individuate e quindi ulteriormente trascurabili in termini di disturbo all'interno degli edifici.