

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA
LEGGE OBIETTIVO N. 443/01**

U.O. ARCHITETTURA AMBIENTE E TERRITORIO

PROGETTO DEFINITIVO

**LINEA PESCARA - BARI
RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI - LESINA
LOTTI 2 e 3 - RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA**

**STUDIO ACUSTICO VIBRAZIONALE
RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE**

SCALA:

-

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

L I 0 2 0 2 D 2 2 R G I M 0 0 0 6 0 0 2 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione definitiva		Nov. 2018		Nov. 2018		Nov. 2018	D. Ludovici Nov. 2018



INDICE

1	PREMESSA	3
2	RIFERIMENTI LEGISLATIVI	4
2.1	ISO 2631 "VALUTAZIONE SULL'ESPOSIZIONE DEL CORPO UMANO ALLE VIBRAZIONI"	4
2.2	UNI 9614 "MISURA DELLE VIBRAZIONI NEGLI EDIFICI E CRITERI DI VALUTAZIONE DEL DISTURBO"	5
2.3	UNI 9916 "CRITERI DI MISURA E VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DELLE VIBRAZIONI SUGLI EDIFICI",	6
3	VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI IN FASE DI ESERCIZIO DELLA LINEA FERROVIARIA	9
3.1	MODELLO PREVISIONALE	9
3.2	CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE	10
3.3	LA PROPAGAZIONE DELLE ONDE VIBRAZIONALI	14
4	INDIVIDUAZIONE DELLE CRITICITÀ E PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO	19
4.1	CONSIDERAZIONI GENERALI	19
4.2	CONDIZIONI DI ESERCIZIO FUTURE	19
4.3	LIVELLO DI EMISSIONE COMPLESSIVO	20
5	CONCLUSIONI	21

	LINEA PESCARA-BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA LOTTI 2 e 3 - RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA LI02	LOTTO 02 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0006 002	REV. A

1 **PREMESSA**

Il presente documento contiene i risultati dello studio relativo all’impatto vibrazionale prodotto dalla realizzazione del Progetto relativo al raddoppio della linea ferroviaria Termoli-Lesina (Lotti 2 e 3 - Raddoppio Termoli – Ripalta).

Il lavoro tiene conto delle indicazioni delle norme tecniche, emanate in sede nazionale ed internazionale, e si basa anche sui risultati della campagna di rilievi vibrometrici appositamente eseguita nell’ambito della Progettazione in oggetto e a cui si fa riferimento per i dettagli del caso.

L’analisi dei livelli vibrometrici dalla sorgente ai ricettori prossimi alla linea ferroviaria viene effettuata distinguendo le tipologie di convogli effettivamente transitanti sulla ferrovia, le condizioni geologiche che costituiscono il terreno tra ferrovia e ricettori e la tipologia di ricettore in termini di struttura e numero di piani.

Il valore complessivo di accelerazione è confrontato con i limiti indicati dalle norme tecniche per il periodo diurno (h. 07÷22) e il periodo notturno (h. 22÷07), così come previsto dal “*Manuale di Progettazione delle Opere Civili di RFI (cod. RFI RFIDTCSIAMMAIFS001A – dic. 2017)*”.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARA-BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA LOTTI 2 e 3 - RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA LI02	LOTTO 02 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0006 002	REV. A

2 RIFERIMENTI LEGISLATIVI

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 "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:

2.1 ISO 2631 "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 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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARA-BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA LOTTI 2 e 3 - RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA LI02	LOTTO 02 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0006 002	REV. A

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.

2.2 UNI 9614 "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 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 – Valori di soglia di vibrazione relativi al disturbo alle persone (UNI 9614)

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 $L_w = 20 \log_{10} (a_w / 10^{-6} \text{ ms}^{-2})$. 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 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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARA-BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA LOTTI 2 e 3 - RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA LI02	LOTTO 02 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0006 002	REV. A

frequenza più elevato. Nell'Appendice della norma UNI 9614, che non 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.

2.3 UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici",

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

Le strutture comprese nella classificazione riguardano:

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

- edifici vecchi ed antichi con un valore architettonico, archeologico e storico;
- le strutture industriali più leggere spesso concepite secondo le modalità costruttive in uso per gli edifici abitativi.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

	LINEA PESCARA-BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA LOTTI 2 e 3 - RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	LI02	02 D 22	RG	IM0006 002	A	9 di 21

3 VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI IN FASE DI ESERCIZIO DELLA LINEA FERROVIARIA

L'esercizio di una linea ferroviaria è fonte di sollecitazioni dinamiche nel terreno circostante. 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.

Le vibrazioni sono in grado di determinare effetti indesiderati sulla popolazione esposta e sugli edifici. Il disturbo sulle persone, classificato come "annoyance", dipende in misura variabile 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. Tale situazioni si verificano tuttavia in corrispondenza di livelli di vibrazione notevoli, superiori di almeno un ordine di grandezza rispetto ai livelli tipici dell'annoyance.

Nel caso specifico il territorio interessato dal progetto, se si esclude il tratto iniziale, ove viene attraversato un territorio più antropizzato (Termoli) è di tipo rurale, caratterizzato da un'alternanza di aree agricole/incolti, residenze sparse e strutture del produttivo industriale e artigianale. La tipologia edilizia è costituita per le residenze da fabbricati mediamente di 1-2 in parte con struttura in muratura e in parte con struttura in c.a.

I terreni affioranti interessati dal tracciato di progetto sono principalmente sciolti e presentano un comportamento abbastanza omogeneo in relazione al trasferimento di onde vibratorie.

Per quanto riguarda le sorgenti vibrazionali attualmente presenti si evidenziano una serie di infrastrutture stradali di vario tipo che in alcuni casi corrono parallelamente alla tratta ferroviaria e in altri casi ne attraversano il tracciato.

3.1 Modello previsionale

Il quadro previsionale è stato sviluppato mediante l'adozione di un modello di propagazione teorico supportato da dati sperimentali. Nel caso specifico, a seguito di indagini specifiche del territorio in esame, sono stati utilizzati i dati desunti dai rilievi vibrazionali eseguiti per valutare la trasmissione delle vibrazioni.

Per valutare le potenziali situazioni di impatto vibrazionale è necessario conoscere i tre elementi di seguito elencati:

- emissione della sorgente;
- propagazione nei terreni;

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARA-BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA LOTTI 2 e 3 - RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA LI02	LOTTO 02 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0006 002	REV. A

- risposta dei fabbricati.

I tre elementi suddetti rappresentano pertanto la base indispensabile per lo sviluppo del modello sperimentale.

Il livello di vibrazione in corrispondenza di un ricettore ad una distanza "x" dalla sede ferroviaria è pari al livello alla distanza di riferimento " x_0 ", diminuito della somma delle attenuazioni che si verificano nel terreno tra x_0 e x:

$$L(x) = L(x_0) - \sum_i A_i$$

Il livello di base $L(x_0)$ è generalmente ricavato da misure sperimentali svolte in adiacenza alle linee ferroviarie a distanze comprese tra 5 m e 25 m.

3.2 Caratterizzazione della sorgente

Per quanto concerne la sorgente costituita dal complesso treno–armamento è indispensabile la conoscenza dei seguenti elementi base:

a) Materiale rotabile:

- tipologia dei veicoli;
- carico per ruota;
- lunghezza del veicolo;
- interperno; passo del carrello;
- caratteristiche di aggressività;
- condizioni di alterazione dell'interfaccia ruota-rotaia
- rigidità e capacità dissipativa della sospensione primaria del carrello del veicolo
- caratteristiche dei sistemi di attacco della rotaia

b) Armamento

- massa della rotaia
- rigidità

- smorzamenti
- masse
- coefficienti di difettosità

I dati utilizzati per la caratterizzazione della sorgente si riferiscono ad una campagna di rilevamenti eseguita lungo l'attuale linea in esercizio. La strumentazione è stata posizionata presso due punti di misura (corpo ferroviario in rilevato basso), a differenti distanze per verificare la propagazione del fenomeno vibratorio.

I rilievi presso la prima postazione di misura (ad una distanza di circa 8 metri dalla sede ferroviaria), hanno permesso di determinare uno spettro di emissione caratteristico per i fenomeni considerati, ottenuto mediando i valori spettrali istantanei massimi corrispondenti al passaggio dei convogli ferroviari rilevati.

La seguente figura mostra gli spettri rilevati (Asse Z) e la stima dello spettro di emissione ritenuta valida per il caso di progetto:

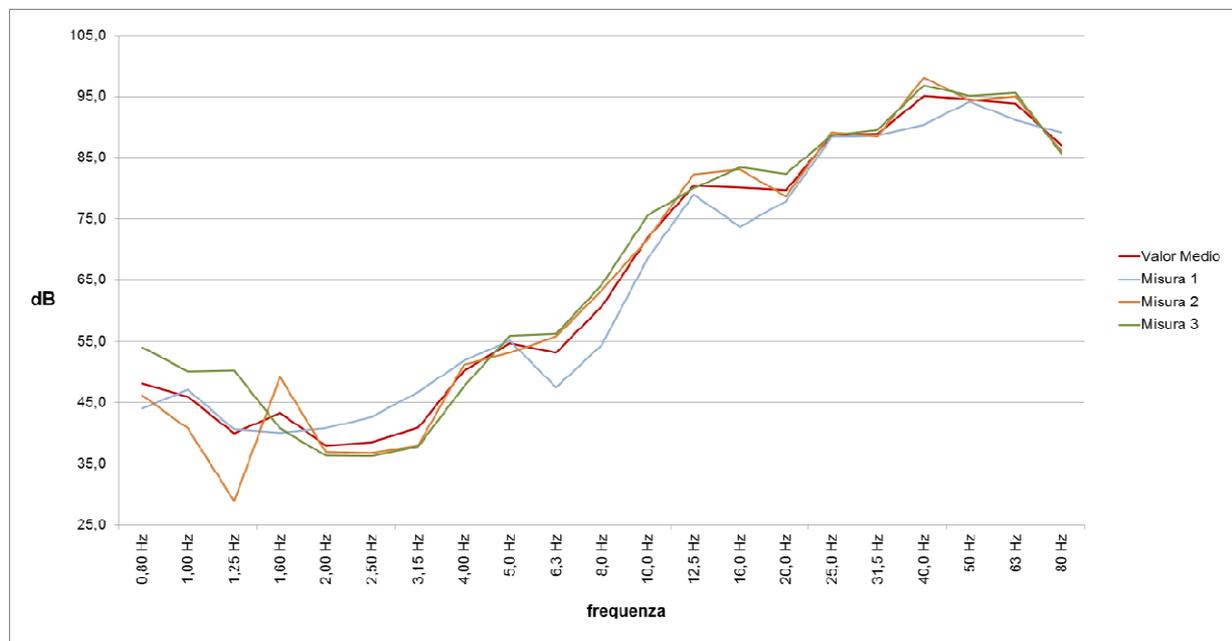


Figura 1–Spettri istantanei massimi dei singoli convogli rilevati a 8 m

Lo spettro tipico, rilevato presso il punto di osservazione, risulta essere il seguente:

Frequenza (Hz)	Ampiezza Accelerazione in direzione Z (dB)
0,80 Hz	48,1
1,00 Hz	46,0
1,25 Hz	39,9
1,60 Hz	43,3
2,00 Hz	38,0
2,50 Hz	38,5
3,15 Hz	40,8
4,00 Hz	50,2
5,0 Hz	54,7
6,3 Hz	53,2
8,0 Hz	60,7
10,0 Hz	72,0
12,5 Hz	80,4
16,0 Hz	80,1
20,0 Hz	79,7
25,0 Hz	88,7
31,5 Hz	88,9
40,0 Hz	95,1
50 Hz	94,6
63 Hz	93,9
80 Hz	87,0

Analogamente, la distribuzione spettrale caratteristica del passaggio di un treno in corrispondenza del secondo punto di osservazione (posto ad una distanza pari a 27 metri dal sedime ferroviario) è stata ottenuta mediando i valori spettrali (Asse Z) corrispondenti ai picchi di accelerazione chiaramente riconoscibili nel grafico che riporta l'andamento temporale e che sono attribuibili al passaggio di veicoli ferroviari.

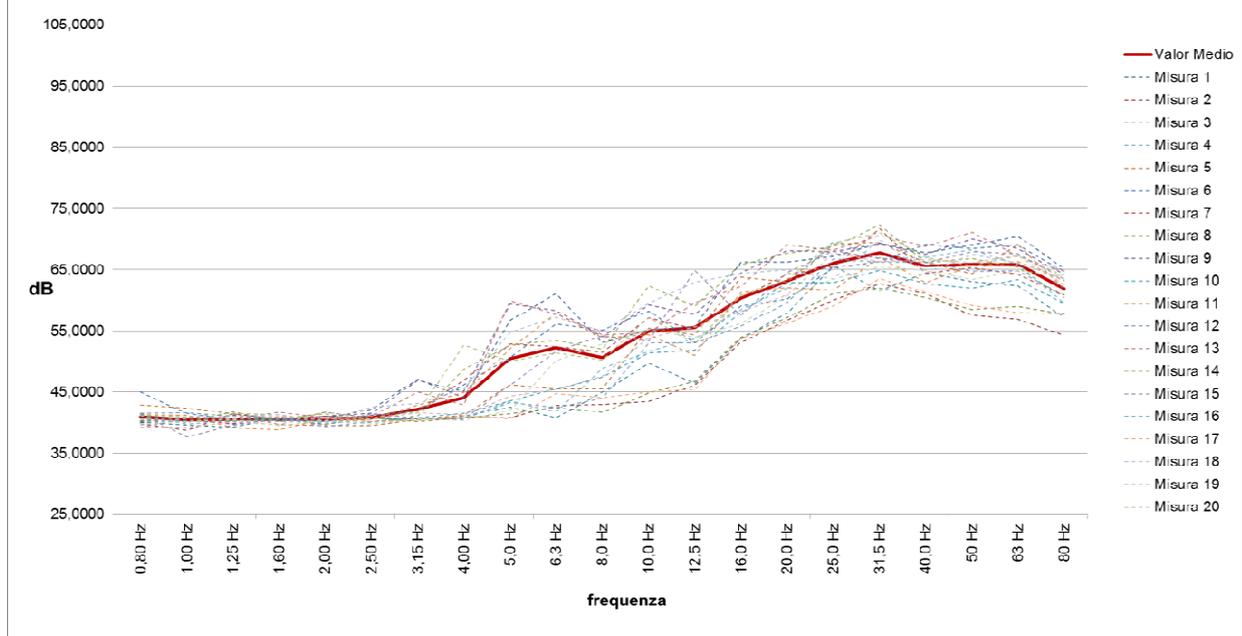


Figura 2–Spettri istantanei massimi dei singoli convogli rilevati a 27 m

Lo spettro tipico rilevato presso del secondo punto di osservazione, risulta essere il seguente:

Frequenza (Hz)	Ampiezza Accelerazione in direzione Z (dB)
0,80 Hz	40,9
1,00 Hz	40,4
1,25 Hz	40,6
1,60 Hz	40,5
2,00 Hz	40,5
2,50 Hz	40,8
3,15 Hz	42,2
4,00 Hz	44,1
5,0 Hz	50,5
6,3 Hz	52,3
8,0 Hz	50,7
10,0 Hz	55,0
12,5 Hz	55,6
16,0 Hz	60,4
20,0 Hz	63,1
25,0 Hz	66,1
31,5 Hz	67,7
40,0 Hz	65,6

Frequenza (Hz)	Ampiezza Accelerazione in direzione Z (dB)
50 Hz	66,0
63 Hz	65,9
80 Hz	61,9

Di seguito, si riporta una tabella di sintesi con indicati i valori medi delle accelerazioni dei livelli equivalenti espressi in decibel per i treni che hanno circolato. Come si evince dall'analisi della tabella, si ottengono valori decrescenti all'aumentare della distanza dalla ferrovia.

P1-Z	P2-Z
87,2	74,4

Livello equivalente medio (Leq,te in decibel) delle accelerazioni (periodo dei transiti ferroviari)

3.3 La propagazione delle onde vibrazionali

L'attenuazione geometrica

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

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

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

La propagazione delle onde nei terreni sciolti

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

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.

Si considera che i ricettori interessati dallo studio sorgono prevalentemente su terreni sciolti di varia natura e granulometria (depositi alluvionali).

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:

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

dove:

RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
LI02	02 D 22	RG	IM0006 002	A	16 di 21

- x : distanza dall'asse della linea ferroviaria
- Ω : frequenza [rad*s⁻¹]
- η : coeffic. di assorbimento del terreno (fattore di perdita)

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

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

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

$$A_1 = 20 \cdot \log[(1 + d_c \cdot c_c / d_a \cdot c_a) / 2]$$

dove:

d_c, d_a = densità dei suoli "c" e "a"

c_c, c_a = velocità di propagazione nei suoli "c" e "a"

In considerazione della tipologia dei terreni interessati, per la costruzione del modello sperimentale sono stati utilizzati i dati rilevati dalla campagna di rilievi già citata; si nota che, conoscendo la mutua distanza tra le postazioni, dai dati sperimentali è possibile estrapolare le funzioni di attenuazione che descrivono la propagazione nel terreno dell'onda vibrazionale in funzione della distanza.

La propagazione delle onde nelle strutture edilizie

La propagazione delle vibrazioni negli edifici antistanti le linee ferroviarie e la risposta di pareti e solai dipende dalle caratteristiche costruttive dell'edificio, Al fine delle valutazioni è importante separare due aspetti fondamentali del fenomeno:

- l'interazione suolo-fondazioni
- la propagazione nel corpo dell'edificio

Il primo aspetto è legato al fatto che la mancanza di solidarietà all'interfaccia terreno-struttura dà luogo a fenomeni dissipativi, configurandosi come un fenomeno favorevole. Detto fenomeno è perciò condizionato dalla tipologia delle fondazioni (fondazioni a platea, fondazioni su plinti isolati, pali di fondazioni, ecc.). Nel caso di fondazioni a platea la grande area di contatto con il terreno determina una perdita di accoppiamento praticamente nulla alle basse frequenze fino alla frequenza di risonanza della fondazione. Per le altre tipologie di fondazioni possono essere utilizzate curve empiriche che consentono la stima dei livelli di vibrazione della fondazione in funzione dei livelli di vibrazione del terreno.

La propagazione nel corpo dell'edificio è determinante sia per il disturbo agli abitanti sia per la resistenza delle strutture in quanto i pavimenti, pareti e soffitti degli edifici sono soggetti a significative amplificazioni delle vibrazioni rispetto a quelle trasmesse dalle fondazioni. In molti casi la risonanza delle strutture orizzontali può causare un'amplificazione delle vibrazioni nel campo di frequenze comprese tra 10 e 30 Hz. I problemi maggiori si verificano quando la frequenza di risonanza dei solai coincide con la frequenza di picco dello spettro di vibrazione del terreno. Negli edifici multipiano un valore di attenuazione delle vibrazioni da piano a piano è approssimativamente pari a 3 dB, I risultati di misure sperimentali (Ishii e Tachibana) in un edificio a 10 piani fuori terra con struttura in calcestruzzo armato e acciaio mostrano un'attenuazione di circa 1 dB alle basse frequenze in corrispondenza dei piani alti e maggiore di 3 dB ai primi piani.

La norma DIN 4150 riferisce che, nel caso di vibrazioni orizzontali le frequenze proprie dei piani di un edificio seguono all'incirca la legge $f = 10/n$, essendo n il numero del piano, Per la componente verticale si hanno circa $f = 10$ Hz per pavimenti poco rigidi e $f = 30$ Hz per pavimenti molto rigidi. Gli incrementi per risonanza possono essere dell'ordine di 3÷8 volte, con rari casi di incrementi fino a 15 volte. Risultati analoghi sono stati ottenuti nel corso di misure eseguite dalle Ferrovie Svizzere: generalmente si ha un'attenuazione nelle componenti orizzontali x e y ($f = 0\div 80$ Hz) tra suolo e piano terra degli edifici ma si verifica un'amplificazione della componente verticale z tra suolo e piano terra e suolo-primo piano. Mediamente l'amplificazione sul pavimento è di 5 dB per frequenze di risonanza di circa 20 Hz, ma può arrivare anche a 20 dB nel caso del pavimento del piano terra con frequenza di risonanza di circa 40 Hz.

La differenza tra il livello di vibrazione del terreno e quello delle strutture di fondazione è detta attenuazione per perdita di accoppiamento (coupling loss). Sono disponibili valori sperimentali medi della perdita di accoppiamento in funzione della frequenza per fondazioni su pali nel terreno o su plinti di edifici in muratura, con o senza intelaiatura. Per fondazioni a platea generale, dato che la vibrazione della stessa può essere considerata simile a quella che si verificherebbe nel terreno senza la presenza della platea, la perdita di accoppiamento è zero alle basse frequenze fino alla frequenza di risonanza della platea.

Le tipologie edilizie prevalenti in adiacenza al tracciato sono rappresentate da edifici storici in muratura, con fondazioni direttamente immerse nel terreno, e edifici di recente edificazione con ossatura in cemento armato e fondazioni continue. L'edificazione appare omogenea e caratterizzata da abitazioni isolate e altezza media di 1-2 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 nulla per l'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.

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 : livello di pressione sonora in dB (0 dB = 20 μ Pa)

L_a : livello di vibrazione di accelerazione all'orizzontamento in dB (0 dB = 1 μ g)

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

	LINEA PESCARA-BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA LOTTI 2 e 3 - RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	LI02	02 D 22	RG	IM0006 002	A	19 di 21

4 INDIVIDUAZIONE DELLE CRITICITÀ E PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO

4.1 Considerazioni generali

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 acustici.

Per quanto riguarda l'individuazione di criticità, in via cautelativa, si è fatto riferimento ai limiti indicati dalla norma ISO 2631/UNI 9614 per le vibrazioni di livello costante, in particolare per la condizione di postura del corpo non nota, per la quale si indicano soglie uguali per tutti i tre assi di riferimento (x, y, z) di 77 dB per il giorno e 74 dB per la notte, per ambiti residenziali. Ciò, pertanto, senza tener conto dei valori di riferimento suggeriti dalla medesima norma nel caso di vibrazioni prodotte da veicoli ferroviari (89 dB per il giorno - 86,7 dB per la notte).

Applicando i modelli di calcolo precedentemente descritti e le funzioni di trasferimento sperimentali, si rileva che i valori di riferimento di cui alla norma UNI 9614 sono generalmente ad oggi rispettati per tutti i ricettori posti in prossimità dell'esistente tracciato ferroviario.

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.

4.2 Condizioni di esercizio future

Le condizioni di esercizio future sono caratterizzate dalla presenza di due binari paralleli.

Rispetto al modello di esercizio futuro, la linea ferroviaria sarà interessata complessivamente da circa 144 treni/giorno di cui:

- 76 treni/giorno connessi al servizio viaggiatori;
- 68 treni/giorno connessi al traffico merci.

La ripartizione ipotizzata prevede:

- 95% (72 treni) nel periodo diurno e 5% (4 treni) in quello notturno per il traffico viaggiatori;
- 59% (40 treni) nel periodo diurno e 41% (28 treni) in quello notturno per il traffico merci.

Nella tratta iniziale, sino al Bivio Campobasso, il traffico passeggeri diurno conta ulteriori 14 treni viaggiatori nel periodo diurno.

	LINEA PESCARA-BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA LOTTI 2 e 3 - RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA LI02	LOTTO 02 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0006 002	REV. A

4.3 Livello di emissione complessivo

Le accelerazioni complessivamente prodotte dall'esercizio della linea ferroviaria di progetto sono fornite dall'applicazione, al traffico di esercizio previsto, dell'emissione del tipologico di treno definita nei paragrafi precedenti.

Le indagini sperimentali si riferiscono alle condizioni attuali di esercizio, ovvero ad un assetto infrastrutturale attuale ad unico binario per entrambe le direzioni. Il livello di emissione complessivo all'attualità è stato quindi determinato considerando i valori di esposizione nel periodo diurno e notturno riferiti ai treni ad oggi circolanti.

Nelle tabelle seguenti si evince invece, sempre per l'asse Z, in analogia a quanto fatto per le analisi ante operam, il valore complessivo di esposizione nel periodo diurno e nel periodo notturno calcolato sulla base del modello di esercizio atteso in corrispondenza delle due postazioni:

Periodo di riferimento	L P1-Z dB	L P2-Z dB
Livello equivalente Diurno	70,4	57,6
Livello equivalente Notturno	68,2	55,4

LEQ diurno e notturno in dB complessivamente atteso, riferito al programma di esercizio

	LINEA PESCARA-BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA LOTTI 2 e 3 - RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA LI02	LOTTO 02 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0006 002	REV. A

5 CONCLUSIONI

Il livello di esposizione alle vibrazioni dei ricettori lungo la tratta oggetto di studio è stato analizzato mediante degli algoritmi di calcolo calibrati sul territorio mediante gli esiti delle misure condotte sulla linea ferroviaria esistente. I valori di accelerazione complessivi misurati nelle postazioni di indagine lungo la linea ferroviaria esistente risultano sempre inferiori alle soglie di riferimento citati nella norma UNI 9614.

Considerando infatti gli eventi registrati nel giorno di misura, si evince un livello di accelerazione complessivo sull'asse z, a 8 metri dall'asse binario, di circa 70 decibel nel periodo diurno e di circa 68 decibel nel periodo notturno. Allontanandosi da questa, i valori si abbassano fino a circa 58 decibel nel periodo diurno e 55 decibel in quello notturno ad una distanza di 27 metri dall'asse ferroviario.

Estendendo questi risultati su tutta la linea di progetto, tenendo conto del raddoppio della linea, del traffico di esercizio e della tipologia di terreno sostanzialmente analogo a quello presente nell'area dell'indagine strumentale, si evince che tutti i ricettori presenti sono esposti ad un livello di accelerazione inferiore alle soglie di riferimento della norma UNI 9614. Tale verifica è stata eseguita considerando i livelli diurno e notturno riferiti al programma di esercizio (bidirezionale) su ciascun binario (ipotesi cautelativa).

Le considerazioni svolte sono avvalorate dal fatto che sono state assunte in condizioni al contorno più severe di quelle che si verificheranno con la realizzazione dell'opera ferroviaria, in quanto:

- Le indagini sperimentali sono state eseguite in corrispondenza di una sezione della ferrovia in rilevato basso;
- La nuova linea ferroviaria sarà costituita da un armamento nuovo e pertanto più levigato rispetto a quello della linea ferroviaria esistente sulla quale sono stati eseguiti i rilievi.