

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



DIREZIONE TECNICA

U.O. ARCHITETTURA, AMBIENTE E TERRITORIO

PROGETTO FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA

POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA

RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA

STUDIO VIBRAZIONALE

Relazione Generale

SCALA:

-

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

I R 0 E 0 0 R 2 2 R G I M 0 0 0 4 0 0 2 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE DEFINITIVA	M. Mulè <i>M. Mulè</i>	Dic. 2021	A. Velocchia <i>A. Velocchia</i>	Dic. 2021	C. Urciuoli <i>C. Urciuoli</i>	Dic. 2021	C. Ercolani Mag. 2022
B	EMISSIONE DEFINITIVA	M. Mulè <i>M. Mulè</i>	Mag. 2022	A. Velocchia <i>A. Velocchia</i>	Mag. 2022	C. Urciuoli <i>C. Urciuoli</i>	Mag. 2022	<i>C. Ercolani</i> PER EMISSIONE ITALFERR S.p.A. Dott.ssa Carolina Ercolani SDS/ambiente

File: IR0E00R22RGIM0004002B.docx

n. Elab.: xx-xx

INDICE

1	RIFERIMENTI NORMATIVI.....	4
1.1	IL QUADRO DELLE NORME DI RIFERIMENTO	4
2	AREA DI STUDIO	9
2.1	INQUADRAMENTO TERRITORIALE E PROGETTUALE	9
2.2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOTECNICO	9
3	INDAGINI VIBRAZIONALI	11
3.1	RILIEVI DI VIBRAZIONI IN SITU.....	11
3.2	ANALISI DEI RILIEVI	14
3.2.1	Entità vibrazionale e relativa variabilità dei transiti ferroviari	14
3.2.2	Caratteristiche di emissione delle vibrazioni di origine ferroviaria	15
4	STUDIO DELL'IMPATTO DA VIBRAZIONI	17
4.1	LE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO	17
4.2	CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE DI VIBRAZIONI	18
4.2.1	Interazione ruota-rotaia	18
4.2.2	Velocità dei treni.....	20
4.2.3	Corpo ferroviario.....	20
4.3	LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO	21
4.4	LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NELLE STRUTTURE EDILIZIE	27
4.4.1	Risposta degli edifici alle vibrazioni	27
4.4.2	Accoppiamento terreno – fondazioni edificio	28
4.4.3	Trasmissione attraverso l'edificio.....	30
4.4.4	Risonanze strutturali dei solai.....	30
4.4.5	Individuazione delle vibrazioni trasmesse a ciascun edificio e stima della risposta ...	32
4.4.6	Rumore trasmesso per via solida dalle strutture	34
5	LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO	35
5.1	PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO.....	35

5.2	TRAFFICO DI ESERCIZIO.....	36
5.3	LIVELLI DI EMISSIONE	37
5.3.1	Individuazione dei livelli emissivi	37
5.3.2	Livello di emissione massima	38
5.3.3	Livello di emissione complessivo	39
5.4	INDIVIDUAZIONE DELLE POTENZIALI AREE CRITICHE	40
6	CONCLUSIONI	41

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 4 di 42

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 integrante 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 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

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 6 di 42

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 frequenza più elevato. Nell'Appendice della norma UNI 9614:1990, 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.

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;
- 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:

Valori di riferimento per la velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni a 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 1Hz a 10Hz	Da 10Hz a 50Hz	Da 50Hz a 100Hz	Per tutte le frequenze	Per tutte le frequenze
1	Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzione strutturalmente simili	20	Varia linearmente da 20 ($f = 1\text{Hz}$)	Varia linearmente da 40 ($f = 1\text{Hz}$)	40	20

STUDIO VIBRAZIONALE

Relazione generale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0E	00	R 22 RG	IM0004 002	B	8 di 42

			a 40 ($f=50\text{Hz}$)	a 50 ($f=50\text{Hz}$)		
2	Edifici residenziali e costruzioni simili	5	Varia linearmente da 5 ($f = 1\text{Hz}$) a 15 ($f=50\text{Hz}$)	Varia linearmente da 5 ($f = 1\text{Hz}$) a 20 ($f=50\text{Hz}$)	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 ($f = 1\text{Hz}$) a 8 ($f=50\text{Hz}$)	Varia linearmente da 8 ($f = 1\text{Hz}$) a 10 ($f=50\text{Hz}$)	8	3/4

Per frequenze oltre in 100Hz possono essere usati i valori di riferimento per 100Hz

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

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 costruzione 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)	25

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 9 di 42

2 AREA DI STUDIO

2.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE E PROGETTUALE

L'intervento oggetto di studio riguarda il raddoppio della tratta PM228-Albacina.

L'intervento inizia dal PM228, posto alla progressiva Km 228+014, il progetto prevede un raddoppio in stretto affiancamento alla Linea storica per circa 4 Km.

È prevista la soppressione del PL senza prevedere viabilità sostitutiva.

Successivamente il tracciato prosegue sempre con raddoppio in affiancamento realizzato per fasi, con un'alternanza di tratti in rilevato e in trincea.

Si arriva infine alla stazione di Albacina nella quale viene previsto un nuovo PRG per rispondere alle richieste funzionali della Committenza; verrà realizzato un nuovo sovrappasso, dei collegamenti perdonali (rampe scale ed ascensori), e nuovi marciapiedi L utile pari a 250 m e H=55 cm.

I marciapiedi verranno dotati di nuove pensiline ferroviarie.

Nell'area della stazione verrà realizzato un Fabbricato Tecnologico con annesso locale di Consegna ENEL.

Successivamente il tracciato prosegue a semplice binario e si collega con la linea esistente che prosegue, da un lato verso Falconara, e dall'altro verso Macerata.

Nei pressi della stazione di Albacina viene adeguata la Cabina TE necessaria esistente per gestire il corretto assetto delle protezioni della LdC e garantire l'equipotenzialità delle condutture, visto che la linea, come detto in precedenza, prosegue a semplice binario.

2.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOTECNICO

Dal punto di vista geotecnico il tracciato è caratterizzato da una notevole complessità derivante in parte dalla morfologia dell'area entro cui si sviluppa, in gran parte lungo la valle del fiume Esino, ai piedi dei rilievi montuosi che la delimitano, in parte dalla complessità geologica della zona.

L'area sub-pianeggiante di fondovalle è occupata prevalentemente da "alluvioni terrazzate" facenti capo a diverse origini ma in ogni caso si tratta materiali di deposizione non recente, che hanno certamente subito una preconsolidazione dovuta ad alluvioni successive che sono state poi erose, o quanto meno per effetto di "aging" e, per le frazioni coesive superficiali sopra falda, per effetto di essiccazione. Trattandosi di depositi alluvionali la loro composizione è

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 10 di 42

estremamente eterogenea e variabile, ma in linea di massima i livelli ghiaioso sabbiosi presentano valori di SPT molto elevati mentre i livelli più fini presentano consistenza elevata.

Le formazioni di base sono di origine sedimentaria che vanno dai calcari alle marne, con presenza di tutte le composizioni intermedie fra questi due estremi. Questi materiali si presentano spesso fra loro fittamente intercalati. Mentre i materiali calcarei si presentano a tratti molto fratturati a causa delle vicende tettoniche che hanno interessato l'area i livelli marnosi hanno spesso subito un processo di alterazione che spesso interessa spessori notevoli a partire dal tetto della formazione. Tali fasce di alterazione presentano caratteristiche spesso a cavallo fra quelle delle rocce e delle terre.

Nella parte bassa dei versanti, dove le pendenze sono più modeste, sono presenti materiali eluvio colluviali che presentano caratteristiche legate alle formazioni rocciose di origine. Si presentano come miscele di ghiaia e sabbia in corrispondenza dei rilievi calcarei o calcarenitici e con elevate percentuali di materiali fini in corrispondenza di rilievi marnosi.

Nei tratti interessati dal tracciato non sono presenti fenomeni gravitativi significativi.

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 11 di 42

3 INDAGINI VIBRAZIONALI

3.1 RILIEVI DI VIBRAZIONI IN SITU

Nell'ambito del presente progetto è stata eseguita una campagna di rilievi vibrometrici sul campo, i cui risultati sperimentali sono stati utilizzati per la determinazione della propagazione delle onde vibrazionali di origine ferroviaria nel terreno.

Nello specifico è stata eseguita una sezione di misura in corrispondenza delle tratte della linea storica PM228 – Albacina: le terne accelerometriche sono state installate in corrispondenza della stazione ferroviaria di Albacina monitorando un totale di 12 transiti ferroviari.

Allo stato attuale sulla linea è previsto il passaggio di treni regionali e a lunga percorrenza (IC), sporadicamente treni merci.

Le misure sono state eseguite secondo le modalità indicate dalla norma UNI 9614:1990. Lungo la via di propagazione sono stati posizionati tre vibrometri, ciascuno dotato di tre accelerometri (uno per ciascun asse di riferimento) posizionati a 5, 10 e 20 metri dalla linea ferroviaria.

Il posizionamento della postazione è stato individuato considerando un punto di accesso rispetto alla linea storica utile per la corretta ubicazione dei tre sensori triassiali. Per gran parte dello sviluppo del tracciato le caratteristiche del terreno non hanno infatti consentito il simultaneo stazionamento della strumentazione sulla sezione di riferimento. Nel punto prescelto l'installazione è stata invece possibile: le velocità rilevate sono caratteristiche del tratto di linea considerato e pertanto non superano i 30 km/h; ciononostante nel corso delle misure non sono state riscontrate anomalie e quanto registrato rispecchia fedelmente l'emissione dei convogli in transito.

In fase di post elaborazione sono state considerate le velocità effettive di progetto, partendo dalla velocità effettivamente rilevata sul sito di misura.

Gli accelerometri sono stati sistemati in modo da individuare tre componenti ortogonali di accelerazione orientate secondo un sistema di riferimenti allineato con la sorgente di vibrazioni. Nello specifico si identificano l'asse trasversale X, l'asse longitudinale Y e l'asse verticale Z (cfr. scheda di figura seguente):

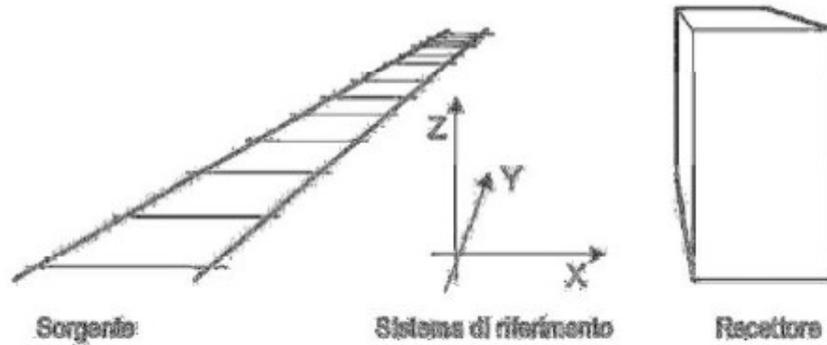
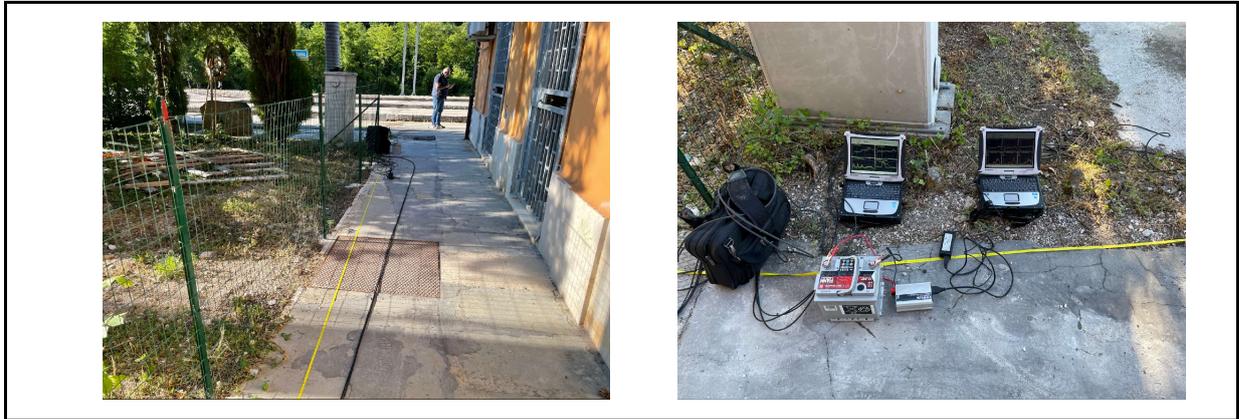


Figura 3.1 - Orientamento delle componenti vibrazionali rispetto alle sorgenti

DATI GENERALI DELLA MISURA TERNA 1 TERNA 2 E TERNA 3

Area Operativa	Linea ferroviaria esistente: Orte - Falconara				
Punto di misura	43°20'44.79"N 12°59'11.48"E				
Monitoraggio	<input type="checkbox"/> Ante operam	<input type="checkbox"/> Corso d'opera	<input checked="" type="checkbox"/> Post operam		
Codice misura	VIB01 – Terna 1 Terna 2 e Terna 3				
Caratterizzazione tipologica delle sorgenti di monitoraggio					
<input type="checkbox"/> Traffico veicolare	<input checked="" type="checkbox"/> Ferroviario - VIF	<input type="checkbox"/> Cantiere - VIL	<input type="checkbox"/> Altro *		
(*)					
Caratteristiche del Monitoraggio					
Il monitoraggio è stato eseguito per un tempo di 4 ore, in contemporanea su tre terne accelerometriche nel giorno 01/06/2021					
Normativa di riferimento					
Le misure per la valutazione del disturbo provocato dalle vibrazioni sono eseguite in conformità alle norme UNI 9614, 9614 2017 ed ISO 2631-2					
Strumentazione adottata: Soundbook					
Documentazione fotografica					
					



Tali rilievi hanno permesso di determinare le caratteristiche di emissione delle vibrazioni di origine ferroviaria.

3.2 ANALISI DEI RILIEVI

3.2.1 Entità vibrazionale e relativa variabilità dei transiti ferroviari

Nella seguente tabella 3.1 si riporta il numero, la tipologia e la velocità media dei convogli transitati lungo le tre sezioni di monitoraggio:

Sezione	REG	IC	ES	V [km/h]
VIB_01	10	1	1	30

Tabella 3.1 - Caratteristiche transiti presso e sezioni di monitoraggio

Non sono stati rilevati i livelli di vibrazione indotti dal transito di convogli merci.

Per tener conto della loro presenza nelle successive fasi di studio sono stati considerati dei fattori correttivi ai livelli di accelerazione rilevati per le diverse categorie di treni determinati sulla base di indagini sperimentali pregresse effettuate lungo altre linee ferroviarie.

3.2.2 Caratteristiche di emissione delle vibrazioni di origine ferroviaria

VIB01 – 5 metri	Durata (s)	Tipo	Direz.	Valori in dB(A) ASSE X		Valori in dB(A) ASSE Y		Valori in dB(A) ASSE Z	
				Leq(-10) (dB)	Lmax (dB)	Leq(-10) (dB)	Lmax (dB)	Leq(-10) (dB)	Lmax (dB)
Data e ora evento									
01/06/2021 08:02:18	9	REG	FABRIANO	48,4	52,5	52,6	56,6	56,1	59,5
01/06/2021 08:14:00	18	REG	ANCONA	57,2	61,2	59,4	63,8	61,1	64,6
01/06/2021 08:30:00	14	REG	ANCONA	57,6	59,4	63,3	65,1	66,5	68,3
01/06/2021 08:31:52	18	ES*	ROMA TERMINI	55,2	57,7	58,4	62,3	62,0	65,4
01/06/2021 09:02:52	16	REG	FABRIANO	60,5	62,6	61,9	65,2	64,2	67,2
01/06/2021 09:12:00	13	REG	ANCONA	54,3	57,4	58,5	62,3	63,2	67,3
01/06/2021 09:52:00	15	REG	FABRIANO	59,6	62,3	60,5	63,2	62,5	65,5
01/06/2021 09:59:00	14	REG	ROMA TERMINI	61,4	64,2	67,1	69,9	70,9	74,3
01/06/2021 10:39:00	11	REG	FABRIANO	63,0	65,3	50,9	52,9	79,8	83,4
01/06/2021 10:47:12	3	REG	Macerata	50,3	54,3	50,3	53,2	63,5	67,1
01/06/2021 10:57:00	15	IC	ANCONA	61,5	64,4	66,6	69,1	70,2	73,5
01/06/2021 11:49:44	6	REG	FABRIANO	50,8	53,4	56,5	59,4	59,2	62,1
VIB01 – 10 metri	Durata (s)	Tipo	Direz.	Valori in dB(A) ASSE X		Valori in dB(A) ASSE Y		Valori in dB(A) ASSE Z	
Data e ora evento				Leq(-10) (dB)	Lmax (dB)	Leq(-10) (dB)	Lmax (dB)	Leq(-10) (dB)	Lmax (dB)
01/06/2021 08:02:18	6	REG	FABRIANO	49,5	50,6	50,1	51,8	56,6	59,6
01/06/2021 08:14:00	18	REG	ANCONA	56,0	60,6	56,8	61,4	63,1	67,5
01/06/2021 08:30:00	14	REG	ANCONA	57,8	59,7	61,0	63,7	68,1	69,7
01/06/2021 08:31:52	17	ES*	ROMA TERMINI	54,0	57,0	54,3	57,1	61,9	64,7
01/06/2021 09:02:52	16	REG	FABRIANO	59,7	62,6	59,1	62,7	66,0	68,2
01/06/2021 09:12:00	14	REG	ANCONA	54,8	58,0	55,4	58,5	64,4	68,3
01/06/2021 09:52:00	16	REG	FABRIANO	58,0	60,8	57,8	61,4	51,8	55,2
01/06/2021 09:59:00	15	REG	ROMA TERMINI	62,2	65,5	62,8	66,5	72,7	76,1

01/06/2021 10:39:00	5	REG	FABRIANO	41,4	42,7	37,4	42,2	42,2	48,0
01/06/2021 10:47:12	6	REG	Macerata	51,1	54,9	49,8	52,0	55,7	60,3
01/06/2021 10:57:00	16	IC	ANCONA	61,6	65,0	62,0	66,1	73,3	76,8
01/06/2021 11:49:44	9	REG	FABRIANO	41,7	43,1	37,8	43,7	41,4	45,0
VIB01 – 20 metri				Valori in dB(A) ASSE X		Valori in dB(A) ASSE Y		Valori in dB(A) ASSE Z	
Data e ora evento	Durata (s)	Tipo	Direz.	Leq(-10) (dB)	Lmax (dB)	Leq(-10) (dB)	Lmax (dB)	Leq(-10) (dB)	Lmax (dB)
01/06/2021 08:02:18	7	REG	FABRIANO	48,0	50,2	46,0	47,4	45,7	47,8
01/06/2021 08:14:00	18	REG	ANCONA	50,4	54,1	51,3	54,8	53,1	57,8
01/06/2021 08:30:00	14	REG	ANCONA	54,1	56,2	56,2	58,2	55,3	57,2
01/06/2021 08:31:52	13	ES*	ROMA TERMINI	48,7	50,4	47,8	49,5	50,0	52,4
01/06/2021 09:02:52	15	REG	FABRIANO	53,2	56,0	54,9	58,2	55,7	59,1
01/06/2021 09:12:00	10	REG	ANCONA	50,7	53,6	49,2	51,8	49,7	53,3
01/06/2021 09:52:00	15	REG	FABRIANO	51,5	54,4	53,4	56,2	50,1	53,7
01/06/2021 09:59:00	15	REG	ROMA TERMINI	57,0	59,5	57,2	59,7	54,3	58,3
01/06/2021 10:39:00	11	REG	FABRIANO	54,4	57,1	43,4	30,0	58,0	60,5
01/06/2021 10:47:12	16	REG	Macerata	52,3	55,2	53,2	55,9	42,1	45,9
01/06/2021 10:57:00	16	IC	ANCONA	57,6	60,3	58,2	60,2	56,4	60,0
01/06/2021 11:49:44	3	REG	FABRIANO	44,9	48,7	42,6	45,8	60,1	61,8

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 17 di 42

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).

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 18 di 42

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 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**

- 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%

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 20 di 42

“	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 sotto forma di onde elastiche. Queste sono generalmente comprese tra i 20 e gli 80 Hz, con livelli di accelerazione

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

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:

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

dove:

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

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

¹ 0 dB \cong 1 μ m/s²

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/m³]	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:

- 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:

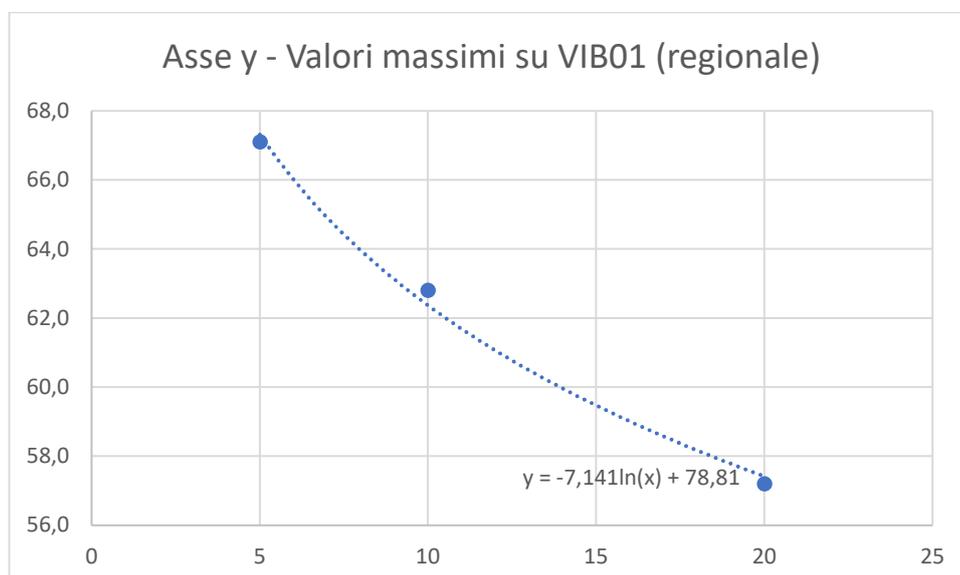
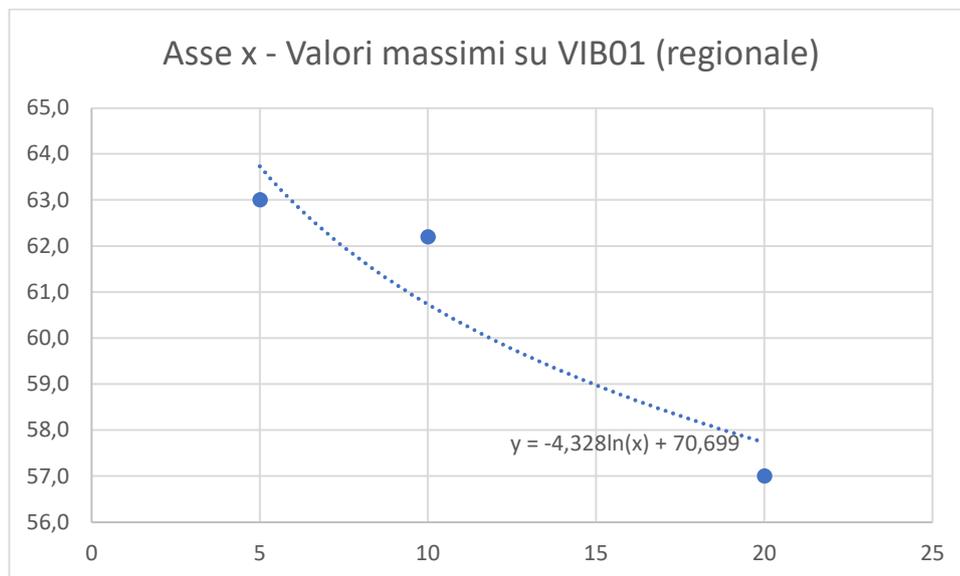
- d_c, d_a = densità dei suoli "c" e "a"
- c_c, c_a = velocità di propagazione nei suoli "c" e "a"

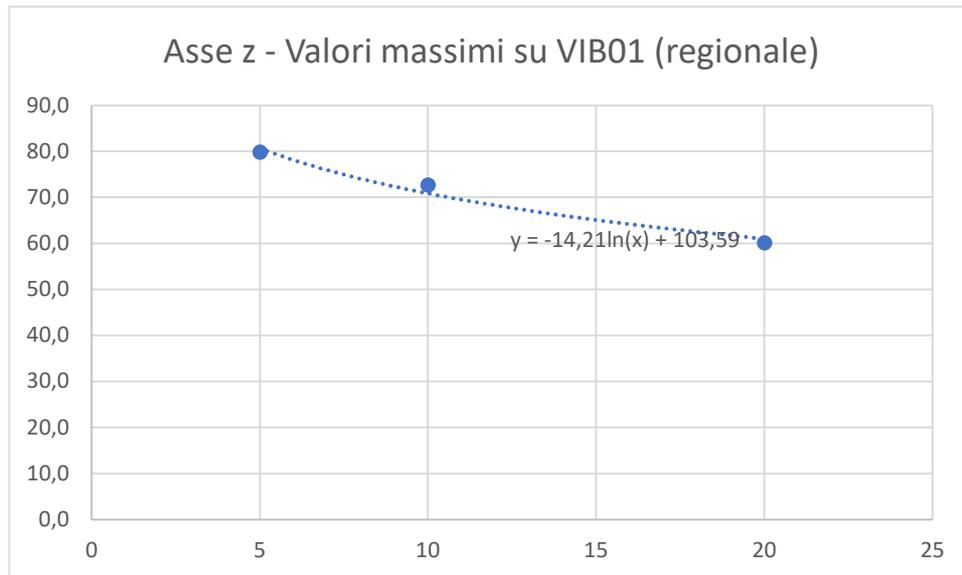
In considerazione dei molteplici fattori che possono condizionare il trasferimento delle vibrazioni nel suolo, per le diverse tratte ferroviarie oggetto di analisi, ovvero in viadotto, galleria, all'aperto (raso, rilevato o trincea), la costruzione del modello previsionale per la verifica degli impatti vibrazionali si basa sull'analisi dei dati sperimentali rilevati dalla campagna di rilievi effettuata lungo le diverse linee ferroviarie e tipologie di sezioni. A seconda dei livelli vibrazionali rilevati in prossimità delle tre terne T1, T2, e T3 e nota la loro distanza rispetto all'asse della linea ferroviaria si estrae la funzione di attenuazione di tipo logaritmico che meglio descrive la propagazione delle onde vibrazionali nel terreno in funzione della distanza.

A partire dalle misure eseguite sono state determinate le funzioni di attenuazione lungo i tre assi X, Y e Z rappresentative delle due sezioni di misura. Queste saranno successivamente utilizzate nell'implementazione del modello previsionale per la stima dei livelli vibrazionali indotti dalla sorgente ferroviaria secondo il layout progettuale e il modello di esercizio previsto.

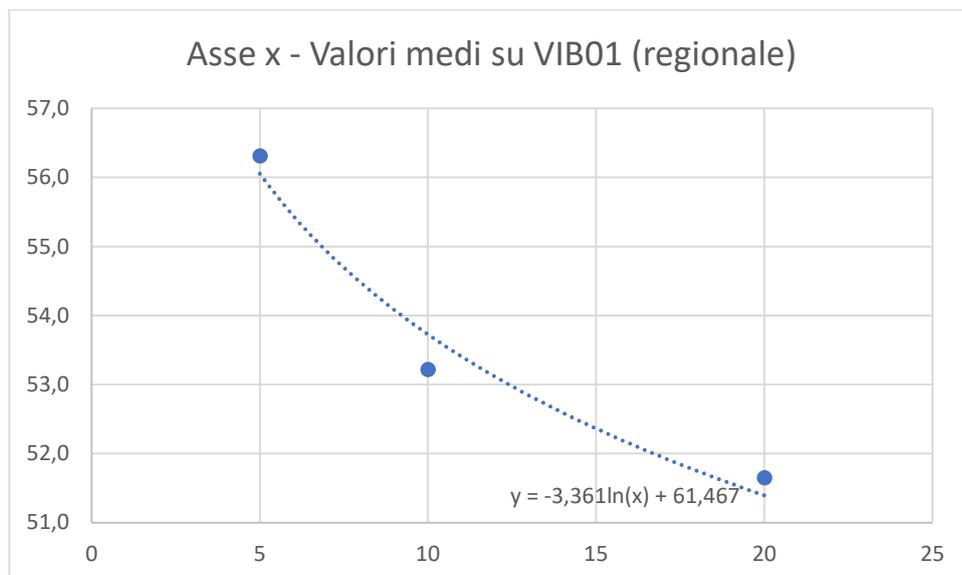
Linea ferroviaria a cielo aperto (raso/rilevato)

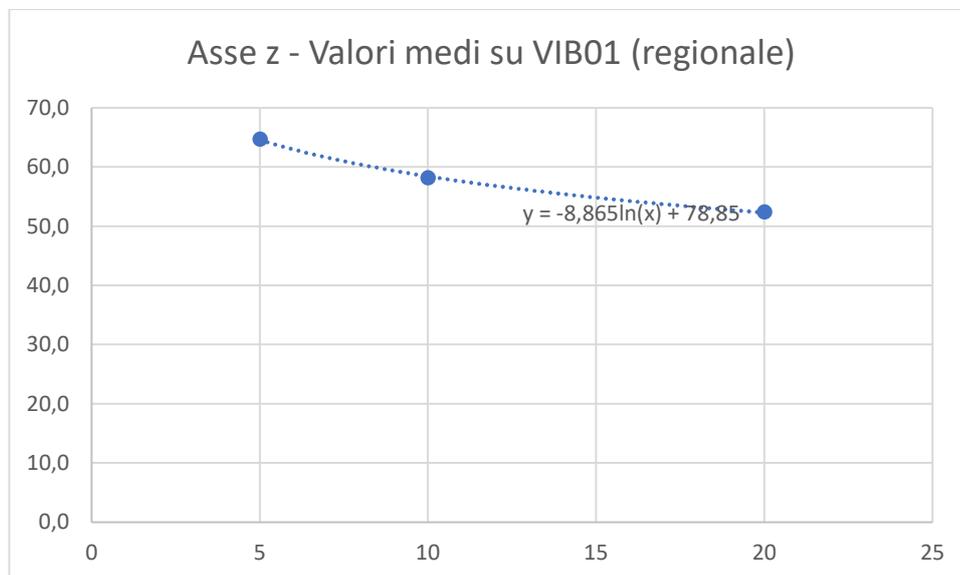
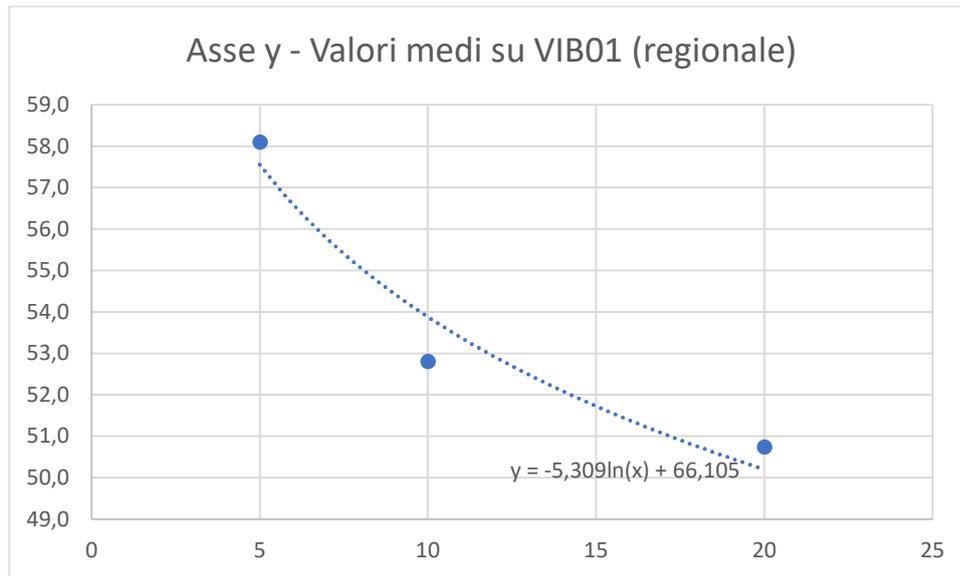
Si riporta di seguito l'andamento massimo in funzione della distanza della sorgente per i convogli di tipo regionale:





Si riporta di seguito l'andamento medio in funzione della distanza della sorgente per i convogli di tipo regionale:





Si sottolinea come per la definizione dei valori medi siano stati esclusi i valori misurati per i quali risulta una evidente anomalia rispetto alla tipologia di treno analizzato e alla distanza di misura.

Per i treni IC ed ES è stato registrato un solo passaggio, pertanto non è possibile stabilire un andamento su un campione significativo e il passaggio stesso rappresenta il riferimento per quella tipologia di convoglio.

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 27 di 42

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 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.

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).

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.

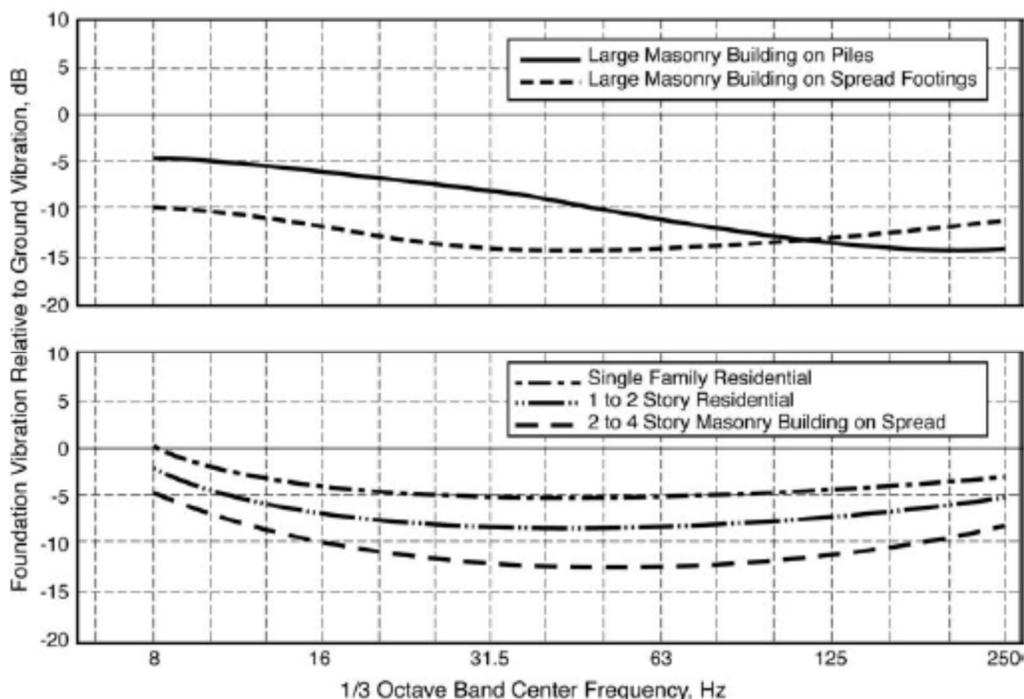


Tabella 4-1 Risposta delle fondazioni per diverse tipologie di edifici (Fonte: FTA, USA)

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.

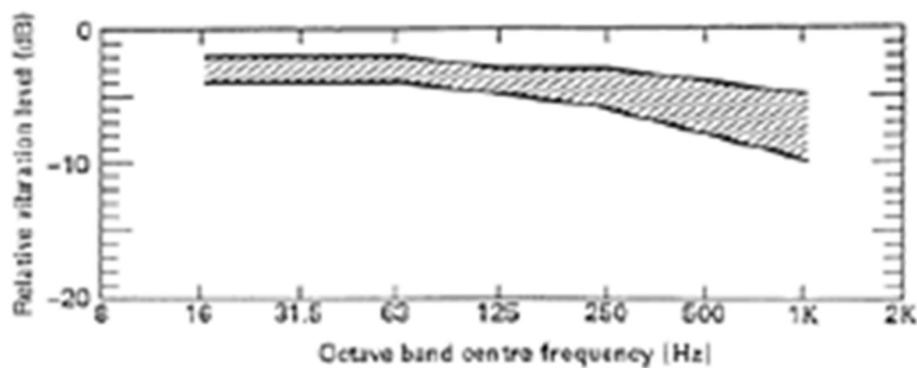


Tabella 4-2 Attenuazione delle vibrazioni nel passaggio da un piano al successivo

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.

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.

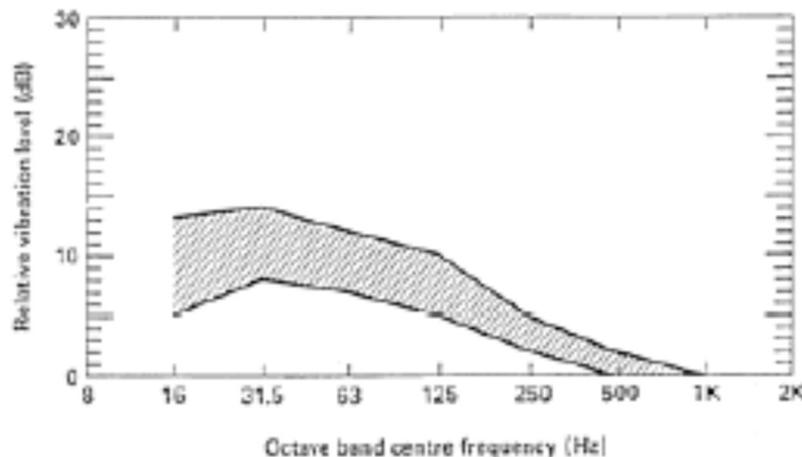


Tabella 4-3 Amplificazione prodotta dai solai

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.

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.

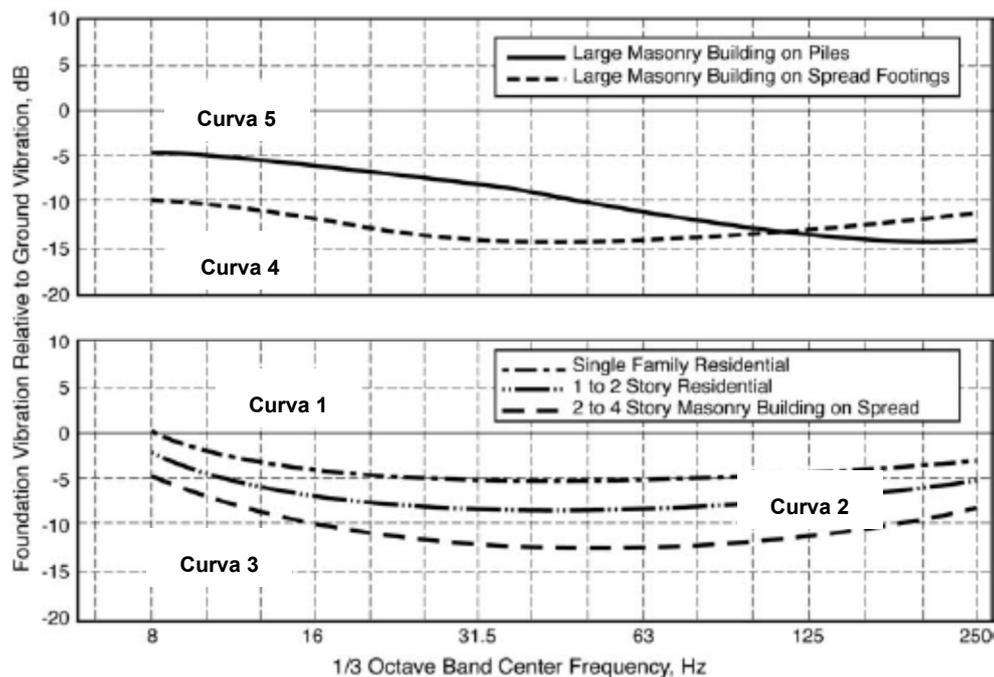


Tabella 4-4 Fattori correttivi dovuti alla tipologia di fondazione

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 33 di 42

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. 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 **+5 dB** per tutti gli edifici.

Tali fattori costituiscono 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 altre linee ferroviarie nazionali.

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 34 di 42

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

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 35 di 42

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, in via cautelativa, si è fatto riferimento ai limiti indicati dalla norma ISO 2631/UNI 9614:1990 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 (89,5 dB per l'asse Z - 86,7 dB per gli assi X e Y). Questi sono stati considerati esclusivamente per la condizione riferita al singolo transito di un convoglio ferroviario secondo l'emissione massima riscontrata durante le campagne di rilievo di caratterizzazione della sorgente.

Applicando i modelli di calcoli precedentemente descritti, le funzioni di trasferimento sperimentali e i dati di caratterizzazione dei singoli transiti massimi e medi e tipologie edilizie sia in c.a. sia in muratura, si è giunti al calcolo della distanza dalla sorgente a cui il livello di accelerazione ponderato risulti 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.

Il valore complessivo di accelerazione che tiene conto anche del modello di esercizio all'orizzonte temporale di progetto, è confrontato con i limiti indicati dalle norme tecniche per il periodo diurno (07-22) e il periodo notturno (22-07), così come previsto dal "Manuale di Progettazione delle Opere Civili di RFI" (cod. RFI DTC SI AM MA IFS 001 D del 31.12.2020), documento di riferimento per lo sviluppo del seguente studio vibrazionale.

Stante le caratteristiche differenti del tracciato che vede esclusivamente la presenza di tratte all'aperto, l'analisi di impatto delle vibrazioni è stata condotta in virtù di tali caratteristiche progettuali e modalità di propagazione delle vibrazioni dedotte dalla campagna di monitoraggio. Per quanto concerne le analisi relative all'intero modello di esercizio giornaliero si fa riferimento ai limiti previsti per le vibrazioni a livello costante indicati dalla norma UNI 9614:1990, per le

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 36 di 42

analisi invece relative al singolo transito si fa riferimento ai livelli specifici indicati dalla medesima norma per i veicoli ferroviari.

Come indicato nel manuale citato, i valori di riferimento suggeriti dalla norma UNI 9614:1990 precedentemente descritti (punto A.4 della Appendice) nel caso di vibrazioni prodotte da veicoli ferroviari, sarebbero invece da confrontare con i livelli dei singoli transiti, distinti per tipologia di convoglio, adottando come intervallo di tempo rappresentativo la durata dell'evento, esclusivamente in caso di tracciato in sotterraneo. Tuttavia, lo studio sui singoli transiti è stato condotto uniformemente lungo tutto il tracciato di progetto ricorrendo al confronto con i suddetti limiti (meno restrittivi).

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.

Di seguito si riporta una schematizzazione delle linea ferroviaria oggetto di studio con i relativi modelli di esercizio previsti e velocità di percorrenza.

TABELLA A2			
SERVIZIO	Totale	FASCIA DIURNA 06:00 - 22:00	FASCIA NOTTURNA 22:00 - 06:00
LP	-	-	-
REG	56	48	8
MERCI	-	-	-
Totale	56	48	8

TABELLA A3			
SERVIZIO	Totale	FASCIA DIURNA 06:00 - 22:00	FASCIA NOTTURNA 22:00 - 06:00
LP	-	-	-
REG	16	14	2
MERCI	-	-	-
Totale	16	14	2

Tabella 5-1 Modello di esercizio per la tratta di interesse

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 37 di 42

Per i treni regionali la velocità di riferimento è pari a 105 km/h.

5.3 LIVELLI DI EMISSIONE

5.3.1 Individuazione dei livelli emissivi

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.

L'individuazione dei livelli emissivi associati ai transiti ferroviari nell'ambito del presente studio è stata desunta dalle indagini sperimentali eseguite lungo l'attuale infrastruttura ferroviaria della linea storica PM228 - Albacina.

Nello specifico, come visto nei capitoli precedenti, la campagna di rilievo consta di una postazione di misura, caratterizzata da tre terne accelerometriche, scelte in modo da caratterizzare i livelli di emissione vibrazionale dei treni in transito in corrispondenza di una tratta ferroviaria in all'aperto (rilevato/raso e leggera trincea). La postazione è costituita da tre accelerometri in grado di rilevare i livelli vibrazionali lungo gli assi X, Y e Z. Questi sono posti a distanze crescenti dal punto di emissione lungo la via di propagazione (5-10-20 metri) in modo che oltre alla caratterizzazione emissiva dalla differenza dei livelli vibrazionali rilevati è stata individuata la curva di attenuazione nel terreno.

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.

Per quanto concerne il **livello di emissione massima**, questo è rappresentato dai valori vibrazionali massimi indotti da un singolo transito di un convoglio ferroviario determinato sulla base dei dati sperimentali e opportunamente corretti rispetto ai valori di velocità massima.

Inoltre, è stato considerato l'ulteriore fattore di **+5dB** per tener conto della propagazione delle vibrazioni all'interno dell'edificio che cautelativamente è stato considerato come fenomeno di amplificazione seppur non sempre verificato in quanto dipende strettamente dalle caratteristiche strutturali del singolo edificio.

Per quanto concerne invece **il livello di emissione complessiva**, ovvero quello associato all'intero modello di esercizio previsto per le diverse tratte ferroviarie nell'arco delle 24 ore e

mediato rispetto al periodo diurno e notturno così come definito dalla norma UNI 9614:1990, si è fatto riferimento ai valori medi emissivi derivanti dall'analisi statistica dei dati sperimentali per ciascuna postazione di misura e tipologia di convoglio ferroviario (regionale, merci, lunga percorrenza, etc.).

Da dati sperimentali è stato desunto come in linea generale i treni merci siano tali da indurre livelli vibrazionali superiori rispetto a quelli regionali di circa +5,4 dB, altresì i treni passeggeri di lunga percorrenza di circa +4,2 dB. Per poter quindi considerare la presenza di tali tipologie di treni nelle analisi previsionali si è tenuto conto di un fattore di correzione per le emissioni dei treni merci e ES/IC pari a +5,4 dB e + 4,2dB rispetto ai livelli associati alla tipologia regionale.

Inoltre, è stato considerato l'ulteriore fattore di **+5dB** per tener conto della propagazione delle vibrazioni all'interno dell'edificio che cautelativamente è stato considerato come fenomeno di amplificazione seppur non sempre verificato in quanto dipende strettamente dalle caratteristiche strutturali del singolo edificio.

È infine stato individuato per la specifica tratta in studio il valore di massima emissione considerando il modello di esercizio previsto, la velocità di percorrenza massima possibile e il periodo temporale di riferimento (limite di riferimento più basso).

5.3.2 Livello di emissione massima

Si è tenuto conto del valore medio rispetto alle condizioni di massimo carico sulla sezione di misura:

	x	y	z	
Lo_{corr1+2+3} 5m	70,7	74,8	87,5	regionale a 5 metri
Lo_{corr1+2+3} 10m	69,9	70,5	80,4	regionale a 10 metri
Lo_{corr1+2+3} 20m	64,7	64,9	67,8	regionale a 20 metri

Le correzioni applicate riguardano la propagazione delle vibrazioni all'interno degli edifici, la tipologia di treno con le dovute maggiorazioni e la velocità di transito come da progetto.

Dall'applicazione del modello sperimentale individuato sulla base delle misure eseguite nell'area di studio, si evince secondo la norma UNI 9614:1990 l'ampiezza della fascia di potenziale disturbo da vibrazioni sui ricettori indotta dal transito di un singolo treno nel periodo strettamente connesso al suo passaggio sia nel periodo diurno che notturno.

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 39 di 42

Dal confronto tra il livello emissivo di origine ferroviaria secondo la sua legge di propagazione in funzione della distanza dall'asse della linea ferroviaria e i valori limite indicati dalla norma UNI 9614:1990 per le sorgenti ferroviarie (appendice A4) e riferiti secondo la metodologia di studio al transito di un singolo convoglio ferroviario nella condizione di massima emissione, si evince come per tutte le categorie:

- per l'asse X il valore di riferimento di 86,7 dB viene raggiunto ad una distanza inferiore a 5 m dall'asse della linea ferroviaria e pertanto non sussistono superamenti;
- per l'asse Y il valore di riferimento di 86,7 dB viene raggiunto ad una distanza inferiore a 5 m dall'asse della linea ferroviaria e pertanto non sussistono superamenti;
- per l'asse Z il valore di riferimento di 89,5 dB viene raggiunto ad una distanza inferiore a 5 m dall'asse della linea ferroviaria e pertanto non sussistono superamenti.

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 e corretti in funzione delle varie velocità di percorrenza previste per le diverse tratte. Anche in questo caso sono stati applicati dei fattori di correzione ai valori sperimentali desunti in ragione della non disponibilità di dati specifici derivanti dalle campagne di misura.

Il contributo energetico associato all'intero modello di esercizio è stato poi rapportato all'intero periodo diurno e notturno. Anche in questo caso le analisi hanno tenuto conto della propagazione all'interno degli edifici considerando un fattore cautelativo di amplificazione di **+5dB** per tener conto della propagazione nell'accoppiamento terreno-fondazioni.

Considerando quindi i livelli di emissione complessivi, dall'applicazione del modello previsionale individuato, si evince:

- Il livello limite diurno di 77 dB per le abitazioni nel periodo diurno viene raggiunto internamente agli edifici ad una distanza inferiore a 4 metri dalla mezzeria del binario esterno;
- Il livello limite notturno di 74 dB per le abitazioni nel periodo notturno viene raggiunto internamente agli edifici ad una distanza inferiore a 2 metri dalla mezzeria del binario esterno.

5.4 INDIVIDUAZIONE DELLE POTENZIALI AREE CRITICHE

L'individuazione delle aree critiche si basa sull'analisi del contesto territoriale attraversato dalla linea ferroviaria oggetto di studio e dalle analisi sviluppate nell'ambito dello studio acustico di individuazione dei ricettori all'interno dei diversi ambiti di studio. Specificatamente alle analisi vibrazionali l'analisi del contesto territoriale è stata estesa assumendo un ambito di studio definito da una ampiezza di 50 m per lato.

La determinazione dei livelli equivalenti delle accelerazioni, calcolate secondo il modello di esercizio futuro della linea ferroviaria oggetto di studio e riferiti sia al singolo transito ferroviario che all'intero modello di esercizio attraverso il modello previsionale specifico, ha individuato nei diversi casi una distanza dall'asse dalla sorgente emissiva alla quale vengono raggiunti i valori limite previsti dalla norma UNI 9614:1990 sia nel caso di singolo transito emissivo (valori vibrazioni di origine ferroviaria indicati in appendice A4) sia nel caso di modello di esercizio complessivo (valori vibrazioni livelli costante) nel periodo diurno e notturno.

Di seguito si riportano le distanze alle quali i suddetti limiti soglia vengono raggiunti nelle diverse condizioni di analisi assunte nello studio previsionale.

Tratta	Massima emissione singolo transito			Emissione complessiva modello di esercizio	
	Limite asse X 86,7 dB	Limite asse Y 86,7 dB	Limite asse Z 89,5 dB	Limite diurno 77 dB	Limite notturno 74 dB
PM228 – ALBACINA	< 5 m (tutte le categorie)	< 5 m (tutte le categorie)	< 5 m (tutte le categorie)	4 m	2 m

Tabella 5-2 Tabella di sintesi dell'applicazione del modello previsionale: distanze alle quali vengono raggiunti i livelli soglia indicati dalla norma UNI 9614:1990 nelle diverse condizioni di emissione

Ne consegue quindi come all'interno delle suddette fasce e riportate in Tabella 5-2, gli edifici residenziali ubicati all'interno risultino essere soggetti a livelli di vibrazione indotti dalla ferrovia superiori a quelli limite e quindi soggetti a potenziale disturbo vibrazionale. Considerando in primo luogo la condizione associata al transito di un singolo convoglio ferroviario, dalla planimetria del censimento ricettori dello studio acustico non si evincono condizioni di potenziale criticità. La condizione di assenza di aree critiche, ovvero di ricettori residenziali con livelli di vibrazione superiori a quelli limite previsti dalla norma UNI 9614:1990 nel caso di vibrazioni costanti, viene verificata anche considerando l'intero programma di esercizio di progetto nel periodo diurno e notturno. Anche in questo caso, infatti, non si evince la presenza di edifici residenziali per i quali si stima un superamento dei valori di soglia (77 dB nel periodo diurno, 74 dB nel periodo notturno).

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 41 di 42

6 CONCLUSIONI

Il presente studio ha avuto come scopo l'individuazione delle problematiche di propagazione delle vibrazioni indotte dal traffico ferroviario lungo la linea PM228 - Albacina secondo il progetto oggetto di studio.

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 apposite indagini sperimentali eseguite lungo l'attuale linea. 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 tre postazioni di misura per ciascuna indagine eseguita è stata determinata la legge di propagazione delle onde vibrazionali nel terreno specifica al contesto territoriale in studio.

La campagna di misura effettuata non ha permesso di definire il contributo emissivo per ciascuna tipologia di treno prevista dal modello di esercizio (esclusivamente regionali) dato il circolato lungo le diverse linee durante il periodo di campionamento.

Gli algoritmi di calcolo sono stati quindi applicati sia considerando la condizione di singolo transito ferroviario, ovvero nella condizione di massima emissione, sia la condizione di emissione totale, ovvero secondo l'intero modello di esercizio previsto nel periodo diurno e notturno.

Infine, in riferimento alla valutazione interna degli edifici è stato considerato un incremento dei livelli di emissione di **+5 dB**. Le caratteristiche degli edifici sono state individuate dal censimento dei ricettori eseguito nell'ambito dello studio acustico.

Dall'applicazione del suddetto algoritmo di calcolo, si sono individuate le cosiddette aree critiche, ovvero l'ampiezza della fascia rispetto all'asse della linea ferroviaria all'interno della quale si prevede il superamento del valore soglia indicato dalla norma UNI 9614:1990 per la valutazione del disturbo da vibrazioni all'interno degli edifici. Nello specifico nel caso della condizione di singolo transito si è fatto riferimento a quanto nella norma UNI stessa si indica per

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA IR0E	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. B	FOGLIO 42 di 42

le vibrazioni di origine ferroviaria, ovvero ai valori soglia di 89,5 dB per l'asse Z e 86,7 dB per gli assi X e Y. Nella condizione di intero esercizio della linea nel periodo diurno e notturno si è fatto riferimento invece ai valori indicati dalla norma nel caso di vibrazioni a livello costante, ovvero ai seguenti valori soglia: 77 dB nel periodo diurno, 74 dB nel periodo notturno nel caso di edifici residenziali (non sono presenti all'interno dell'ambito di studio edifici sensibili).

Per entrambe le condizioni di analisi (massima emissione del singolo transito, media emissione totale dell'intero modello di esercizio sui periodi di riferimento diurno e notturno) non si evincono condizioni di criticità da vibrazioni, ovvero edifici residenziali i cui valori di accelerazione immessa dalla sorgente ferroviaria sono tali da superare i specifici valori di riferimento.

Ne consegue pertanto come nel caso in studio non vi sono tratte critiche per gli impatti vibrazionali.