

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP J31H9600000011

U.O. ARCHITETTURA, AMBIENTE E TERRITORIO

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA

QUADRUPPLICAMENTO CIAMPINO-CAPANNELLE E PRG CIAMPINO 2^A FASE LATO ROMA

ELABORATI A CARATTERE GENERALE

STUDIO VIBRAZIONALE

Relazione Generale

SCALA:

-

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

NR45 00 R 22 RG IM0004 002 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	C.Giannobile	02/2021	A. Corraja E. Zola	02/2021	T. Paolenti	02/2021	

File: NR4500R22RGIM0004002A.doc

Indice

1	RIFERIMENTI NORMATIVI	2
1.1	IL QUADRO DELLE NORME DI RIFERIMENTO.....	2
2	AREA DI STUDIO.....	7
2.1	INQUADRAMENTO TERRITORIALE	7
2.2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	8
3	INDAGINI VIBRAZIONALI	12
3.1	RILIEVI DI VIBRAZIONI IN SITU	12
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	14
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.....	25
4.4.1	Risposta degli edifici alle vibrazioni	25
4.4.2	Accoppiamento terreno – fondazioni edificio	26
4.4.3	Trasmissione attraverso l'edificio.....	28
4.4.4	Risonanze strutturali dei solai.....	28
4.4.5	Individuazione delle vibrazioni trasmesse a ciascun edificio e stima della risposta	30
4.4.6	Rumore trasmesso per via solida dalle strutture	31
5	LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO	33
5.1	PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO	33
5.2	TRAFFICO DI ESERCIZIO	34
5.3	LIVELLI COMPLESSIVI.....	34
5.3.1	Individuazione dei livelli di vibrazione	34
5.3.2	Livello di emissione complessivo.....	35
5.4	INDIVIDUAZIONE DELLE POTENZIALI AREE CRITICHE.....	39
6	CONCLUSIONI.....	40

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	$3.3 \cdot 10^{-3}$	71
Abitazioni (notte)	$5.0 \cdot 10^{-3}$	74
Abitazioni (giorno)	$7.2 \cdot 10^{-3}$	77
Uffici	$14.4 \cdot 10^{-3}$	83
Fabbriche	$28.8 \cdot 10^{-3}$	89

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

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

	QUADRUPPLICAMENTO CIAMPINO-CAPANNELLE E PRG CIAMPINO 2^ FASE LATO ROMA ELABORATI A CARATTERE GENERALE PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA NR45	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM 00 04 002	REV. A

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

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

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

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

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

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

prospetto D.1

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

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

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

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

prospetto D.2

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

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

2 AREA DI STUDIO

2.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

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



Figura 2-1 Vista aerea dell'inquadramento generale dell'intervento oggetto di studio

L'area di intervento ricade nel territorio del Comune di Roma e del Comune di Ciampino tra le stazioni ferroviarie di Roma Capannelle e di Ciampino lungo le linee di Roma – Cassino e Roma – Castelli Romani. L'ambito di studio è caratterizzato generalmente da un tessuto urbano discontinuo con presenza di edifici residenziali e commerciali in centri abitati. In Ciampino l'ambito è invece fortemente urbanizzato.

2.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

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

In Figura 2-2 e Figura 2-3 vengono riportati, rispettivamente, uno stralcio della carta geolitologica del Piano Regolatore Generale del Comune di Roma (Succhiarelli et al., 2008) ed uno stralcio della carta geologica realizzata nell'ambito dello Studio di impatto ambientale per l'aeroporto G.B Pastine di Ciampino (Canuti et al.; 2015), su cui viene riportata l'ubicazione del tracciato oggetto di studio. La carta pubblicata nell'ambito del PRG del Comune di Roma, in Figura 2-2, evidenzia come l'area di progetto nel Comune di Roma ricada sui depositi piroclastici del Distretto Albano (12) appartenenti all'unità delle Pozzolanelle (VSN2) della Formazione Villa Senni.

La carta geologica redatta da Aeroporti di Roma S.p.A (Figura 2-3) evidenzia come l'area oggetto di intervento nel Comune di Ciampino si trovi sui depositi pleistocenici alluvionali e di Lahar dell'Unità del Tavolato (TAL), il cui contatto con la Formazione Villa Senni in facies Pozzolanelle si trova in prossimità del confine comunale. Viene infine riportato uno stralcio della cartografia geologica di dettaglio, in scala 1:5.000, redatto per il presente studio, sul quale viene riportata l'ubicazione delle indagini realizzate a supporto del presente lavoro.

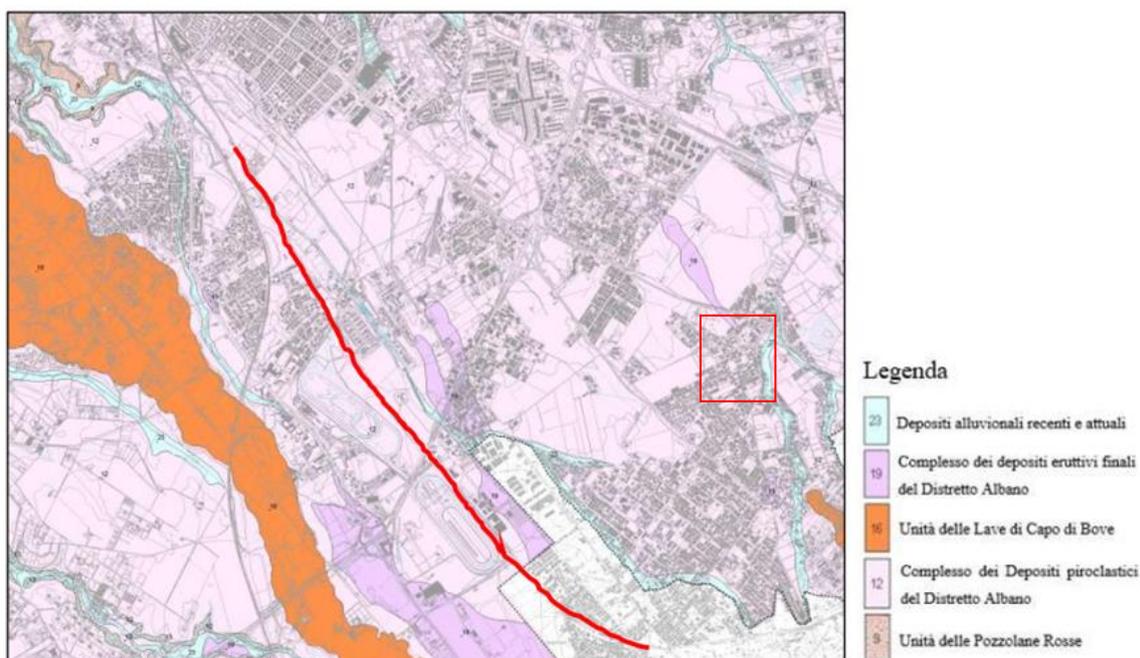


Figura 2-2 Stralcio non in scala del foglio VI della carta geolitologica realizzata in scala 1:20.000 per il Comune di Roma (Succhiarelli et al., 2008). In rosso è evidenziata la linea ferroviaria alla quale si riferisce il presente studio

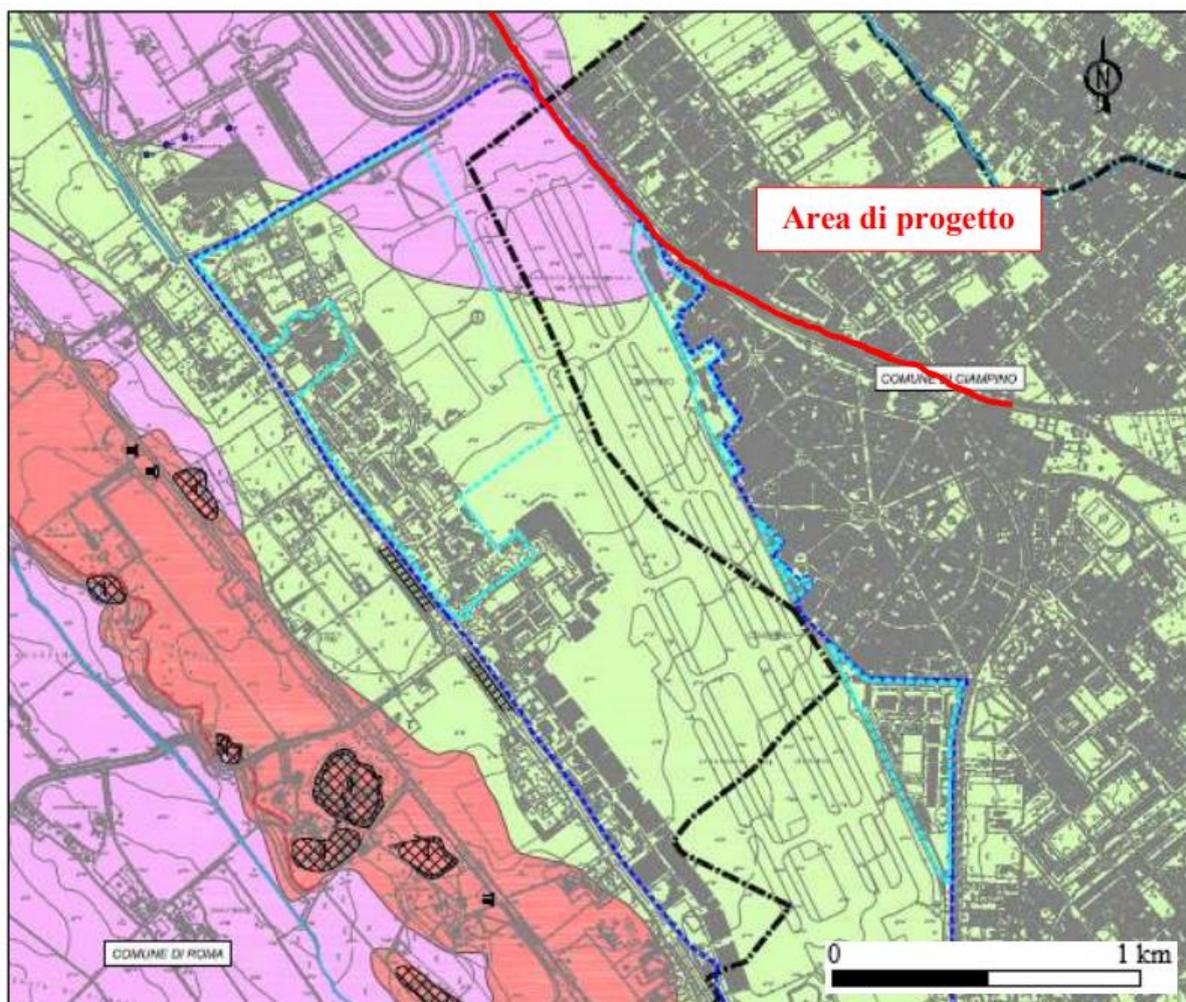


Figura 2-3 Carta geologica realizzata in scala 1:5.000 (Canuti et al.; 2015) e redatta da Aeroporti di Roma per l'aeroporto di G.B Pastine di Ciampino. In rosso è evidenziata la linea ferroviaria alla quale si riferisce il presente studio

	QUADRUPPLICAMENTO CIAMPINO-CAPANNELLE E PRG CIAMPINO 2^ FASE LATO ROMA ELABORATI A CARATTERE GENERALE PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA NR45	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM 00 04 002	REV. A

LEGENDA		GEOMORFOLOGIA	
	Sedime demaniale		Area militare
GEOLOGIA DI SUPERFICIE			
	Formazione del Tavolato: depositi da lahar, da massivi a malstratificati, sabbioso ghiaiosi, intercalati ad orizzonti fluviali e pedogenizzati. <i>Pleistocene Sup.</i>		Orlo di scarpata di degradazione gravitativa
	Formazione di Villa Senni in facies Pozzolanelle: ignimbrite pozzolanacea tefri-fonolitica, clneritica e scoriaea <i>Pleistocene medio.</i>		Orlo di scarpata antropica (h > 3m)
	Colata di Capo di Bove: lava tefritica a k-foiditica, da microcristallina a porfirica, compatta a vacuolare. <i>Pleistocene medio.</i>		Cava abbandonata
			Area di Interesse archeologico
			Conso d'acqua
			Pozzo censito (dati bibliografici)

Figura 2-4 Legenda della Carta geologica realizzata in scala 1:5.000 (Canuti et al.; 2015) e redatta da Aeroporti di Roma per l'aeroporto di G.B Pastine di Ciampino. Inquadramento geomorfologico

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

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

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

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

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

La classificazione ai fini vibrazionali è indicata nella seguente tabella.

Simbologia stratigrafica	Descrizione	Velocità di propagazione delle onde longitudinali [m/s]	Fattore di smorzamento	Densità [kg/m²]
Aa	Terreno prevalentemente sabbioso, con eventuale presenza di limo, ghiaia, loess	600	0,1	1600
FMA	Roccia	3500	0,01	2650
FR	“	“	“	“

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 sono state eseguite misure in corrispondenza di una sezione lungo l'attuale linea attraverso l'installazione di tre terne accelerometriche T1, T2 e T3 poste a distanze crescenti dall'asse del binario in modo da valutare sia l'emissione vibrazionale dei convogli ferroviari che le modalità di propagazione delle vibrazioni nel terreno.



Figura 3-1 Localizzazione delle indagini vibrazionali lungo l'attuale linea Roma – Cassino

Le misure sono state eseguite secondo le modalità indicate dalla norma UNI 9614:1990. Lungo la via di propagazione sono stati posizionati tre vibrometri in corrispondenza del punto denominato VIB01, ciascuno dotato di tre accelerometri (uno per ciascun asse di riferimento) così posizionati:

- Terna 1 (T1): in prossimità dei binari, a circa 15 metri dall'asse del binario più esterno, su terreno sciolto;
- Terna 2 (T2): a circa 20 metri dai binari dell'asse più esterno su un terreno analogo a quello della Terna 1;

- Terna 3 (T3): a circa 25 metri dai binari su un terreno analogo a quello delle Terne 1 e 2.

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).

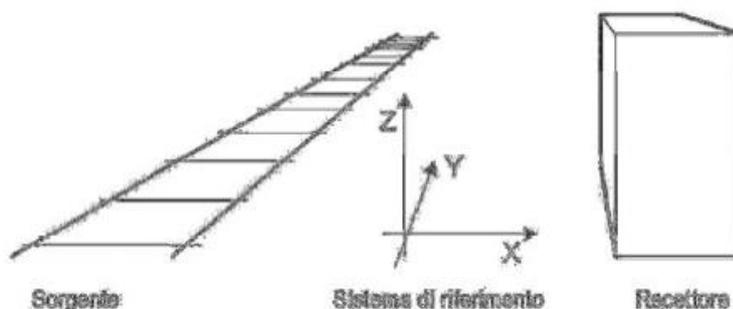


Figura 3-2 Orientamento delle componenti vibrazionali rispetto alle sorgenti



Figura 3-3 Esempio di installazione dell'accelerometro (cfr. elaborato NR4500D22RHIM0004003A)

Tali rilievi hanno permesso di determinare:

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

3.2 ANALISI DEI RILIEVI

3.2.1 Entità vibrazionale e relativa variabilità dei transiti ferroviari

I transiti ferroviari sono caratterizzati da una notevole variabilità dei livelli di accelerazione vibrazionale emessa dovuta alle diverse caratteristiche tipologiche dei convogli e alle condizioni di percorrenza lungo la linea. Nel periodo delle 24 ore di misura sono stati campionati i livelli di accelerazione relativi a 201 treni regionali, 10 treni merci e di 2 treni intercity.

La velocità dei convogli in corrispondenza della sezione di indagine varia tra i 100 e i 110 km/h a seconda della tipologia di convoglio passeggeri e di circa 70 km/h per quanto riguarda i convogli merci.

3.2.2 Caratteristiche di emissione delle vibrazioni di origine ferroviaria

Constatato che nel caso di interesse si è potuto determinare con buona affidabilità che l'emissione vibrazionale è caratterizzata da energia concentrata fra 10 e 80 Hz, nella tabella seguente si riportano i valori dei livelli di accelerazione $L_{w,eq}$ in corrispondenza delle tre postazioni e lungo gli assi X, Y e Z, riferiti alla condizione media ricorrente. Tale analisi è stata differenziata per ciascuna tipologia di componente di traffico.

Tipologia di transito	Velocità media [km/h]	Durata media [s]	Postazione T1 (distanza da binario 15 m)		
			$L_{w,eq}$ media [dB]		
			X	Y	Z
REG	105	23.8	73,4	73,4	70,4
MRC	70	50.2	72,9	72,8	70,0
IC	110	19.0	73,0	73,9	71,8

Tabella 3-1 Livelli di accelerazione $L_{w,eq}$ in dB riferiti alla condizione di media emissione rilevati in corrispondenza del punto T1 (15 m da asse binario)

Tipologia di transito	Velocità media [km/h]	Durata media [s]	Postazione T2 (distanza da binario 20 m)		
			Lw,eq media [dB]		
			X	Y	Z
REG	105	23.8	68,6	67,6	64,7
MRC	70	50.2	66,5	66,8	63,4
IC	110	19.0	69,3	68,3	66,2

Tabella 3-2 Livelli di accelerazione Lw,eq in dB riferiti alla condizione di media emissione rilevati in corrispondenza del punto T2 (20 m da asse binario)

Tipologia di transito	Velocità media [km/h]	Durata media [s]	Postazione T3 (distanza da binario 25 m)		
			Lw,eq media [dB]		
			X	Y	Z
REG	105	23.8	64,6	62,9	61,7
MRC	70	50.2	62,5	62,4	60,5
IC	110	19.0	65,3	63,6	63,2

Tabella 3-3 Livelli di accelerazione Lw,eq in dB riferiti alla nella condizione di media emissione rilevati in corrispondenza del punto T3 (25 m da asse binario)

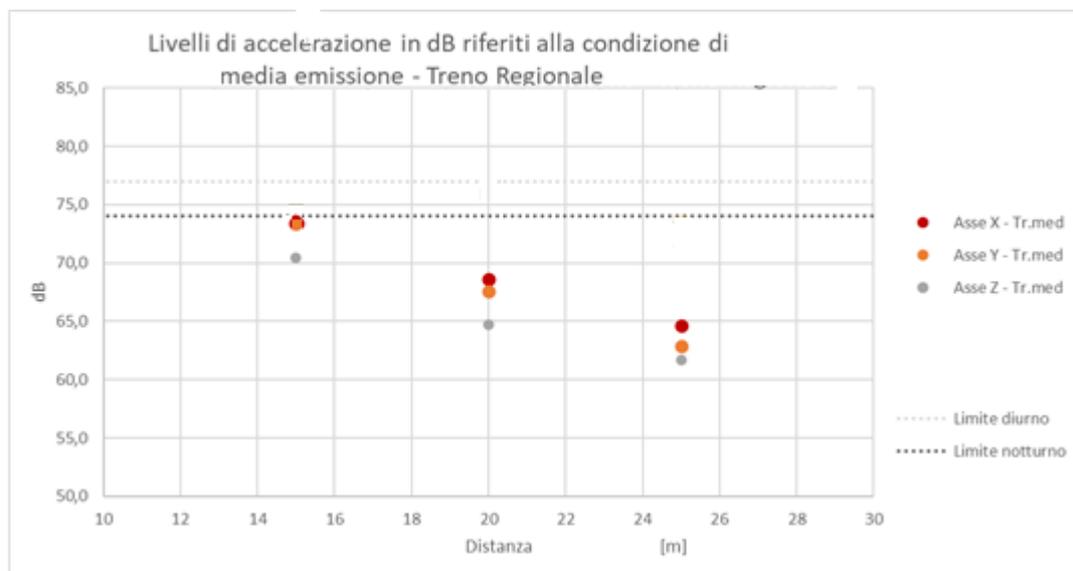


Figura 3-4 Livelli di accelerazione rappresentativi delle condizioni di media emissione a 15, 20 e 25 m dall'asse del binario e confronto con i livelli limite della UNI 9614:1990 – Treno Regionale

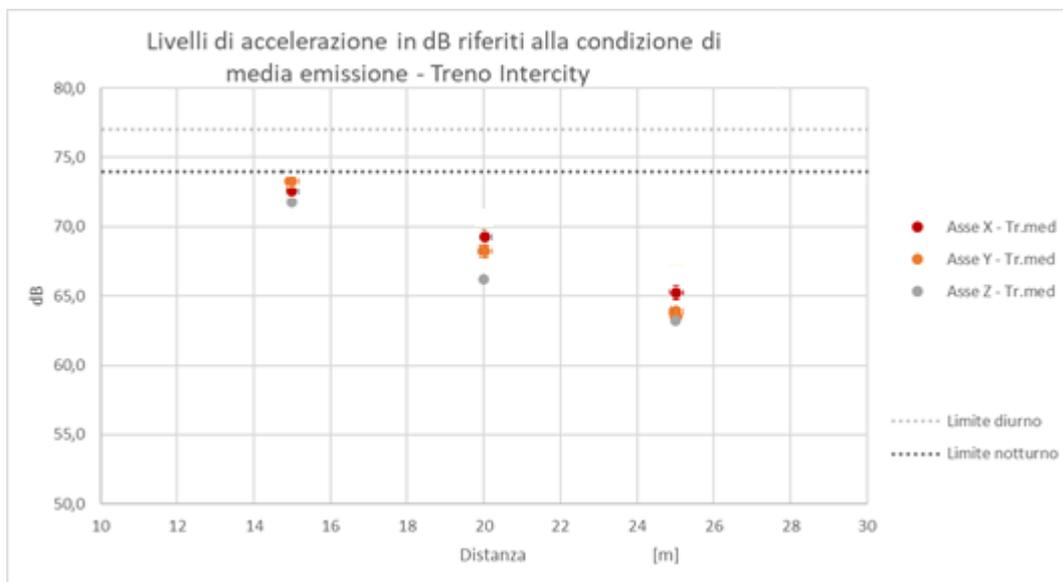


Figura 3-5 Livelli di accelerazione rappresentativi delle condizioni di media emissione a 15, 20 e 25 m dall'asse del binario e confronto con i livelli limite della UNI 9614:1990 – Treno Intercity

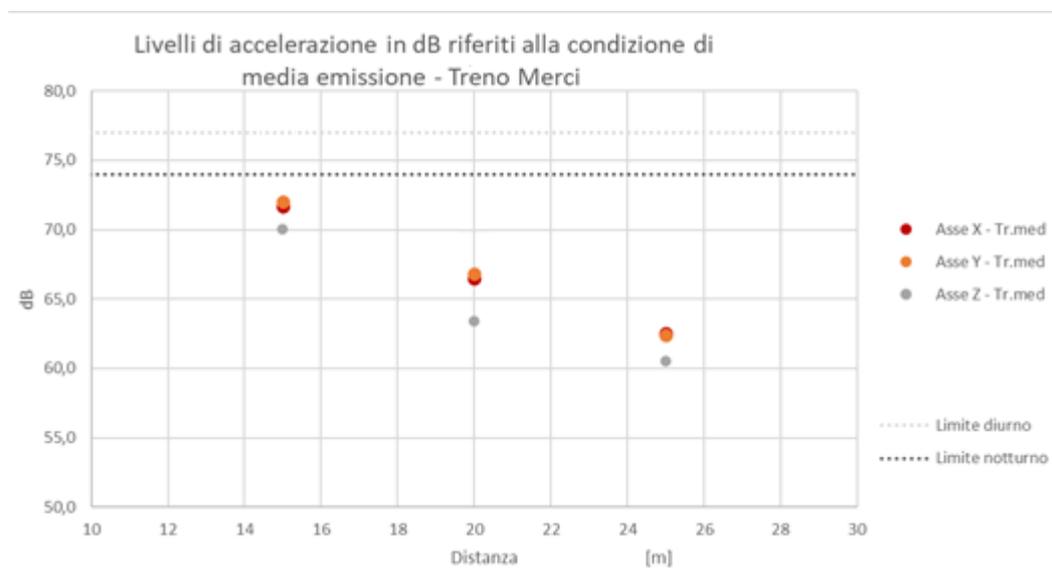


Figura 3-6 Livelli di accelerazione rappresentativi delle condizioni di media emissione a 15, 20 e 25 m dall'asse del binario e confronto con i livelli limite della UNI 9614:1990 – Treno Mercati

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	QUADRUPPLICAMENTO CIAMPINO-CAPANNELLE E PRG CIAMPINO 2^ FASE LATO ROMA ELABORATI A CARATTERE GENERALE PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA NR45	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM 00 04 002	REV. A

4 STUDIO DELL'IMPATTO DA VIBRAZIONI

4.1 LE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO

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

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

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

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

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

Le vibrazioni così generate si propagano nel terreno circostante, sia terreno o roccia, sotto forma di vibrazioni per via solida. Le modalità di propagazione dipendono dalla composizione del terreno, che può influenzare pesantemente l'ampiezza e la stessa velocità di propagazione. Quando l'onda vibrazionale incontra un edificio, la vibrazione può essere percepita sia sotto forma di vibrazione (vibrazioni trasmesse al corpo) sia sottoforma di rumore re-irradiato (di bassa frequenza).

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

	QUADRUPPLICAMENTO CIAMPINO-CAPANNELLE E PRG CIAMPINO 2^ FASE LATO ROMA ELABORATI A CARATTERE GENERALE PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA NR45	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM 00 04 002	REV. A

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	QUADRUPPLICAMENTO CIAMPINO-CAPANNELLE E PRG CIAMPINO 2^ FASE LATO ROMA ELABORATI A CARATTERE GENERALE PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA NR45	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM 00 04 002	REV. A

4.2.2 Velocità dei treni

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

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

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

dove:

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

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

4.2.3 Corpo ferroviario

La vibrazione prodotta dai veicoli ferroviari attraverso la rotaia e la traversina su cui poggia raggiunge la struttura di appoggio sottostante, che può essere costituita da ballast (pietrisco di granulometria definita) o da strutture più o meno complesse in grado di attenuare le vibrazioni (dove si ritiene necessario allo scopo di ridurre l'impatto verso ricettori sensibili). A seconda della tipologia di corpo ferroviario la propagazione delle vibrazioni differisce notevolmente.

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

¹ 0 dB \cong 1 μ m/s²

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:

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

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 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.

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

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

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

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

dove:

- x: distanza dall'asse della linea ferroviaria
- Ω : frequenza [rad*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:

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

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 dei molteplici fattori che possono condizionare il trasferimento delle vibrazioni nel suolo, per la costruzione del modello sono stati utilizzati i dati sperimentali rilevati dalla campagna di rilievi già citata. Si nota che, conoscendo la mutua distanza tra le postazioni, dai dati sperimentali è possibile estrapolare le funzioni di attenuazione, tramite regressione, le quali descrivono la propagazione nel terreno dell'onda vibrazionale in funzione della distanza. Nei grafici seguenti sono riportati i valori sperimentali sui quali è applicata la regressione logaritmica al fine di definire la funzione di trasferimento.

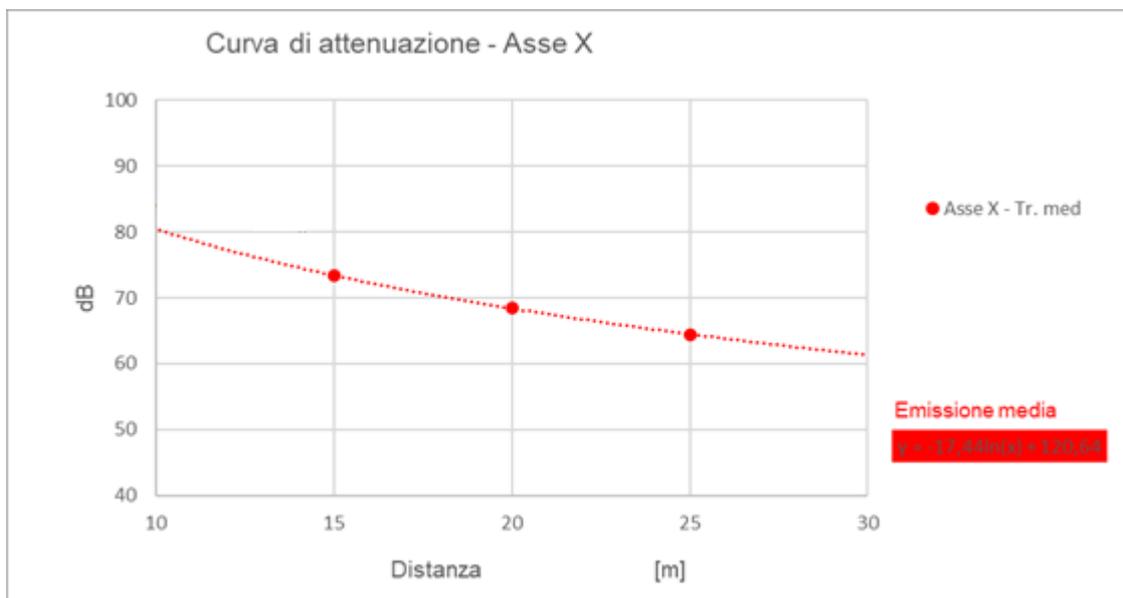


Figura 4-1 Curve e funzioni di attenuazione lungo l'asse X nella condizione di emissione media

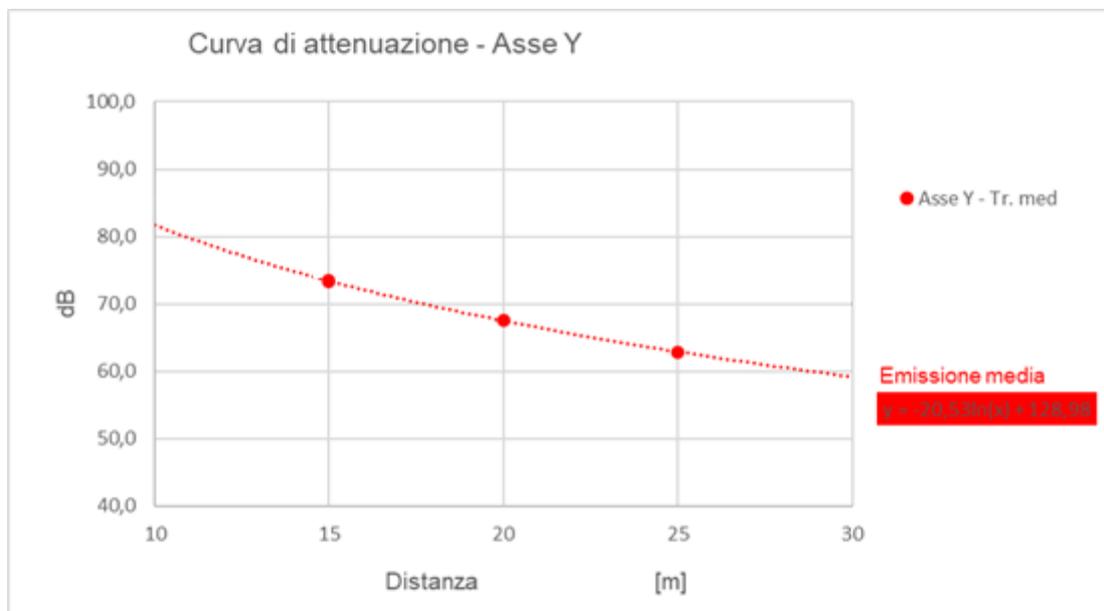


Figura 4-2 Curve e funzioni di attenuazione lungo l'asse Y nella condizione di emissione media

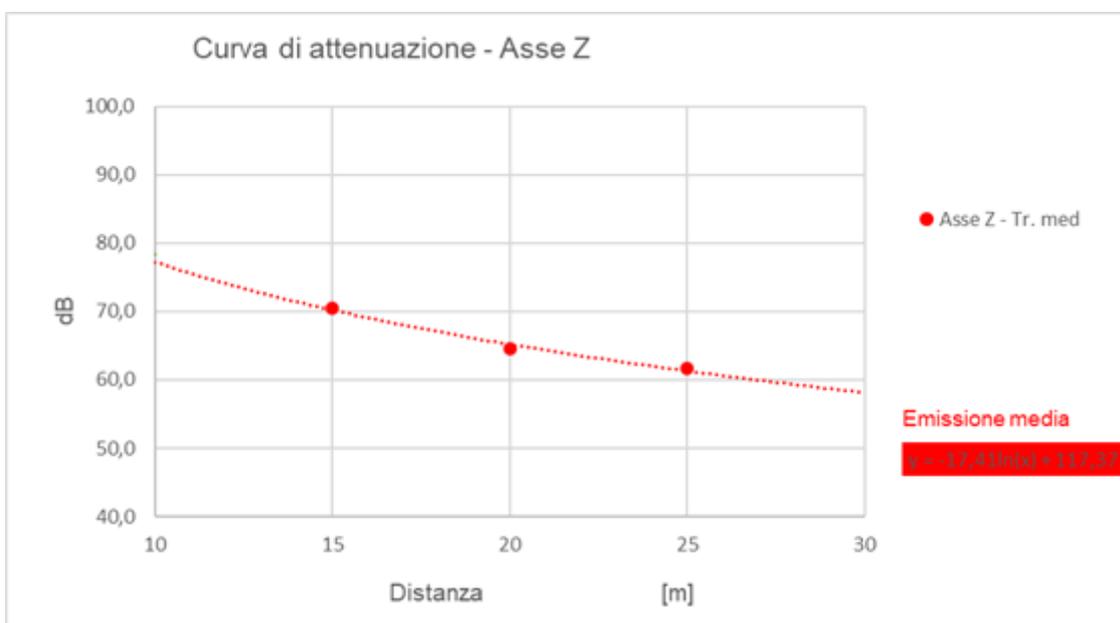


Figura 4-3 Curve e funzioni di attenuazione lungo l'asse Z nella condizione di emissione media

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	QUADRUPPLICAMENTO CIAMPINO-CAPANNELLE E PRG CIAMPINO 2^ FASE LATO ROMA ELABORATI A CARATTERE GENERALE PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA NR45	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM 00 04 002	REV. A

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.

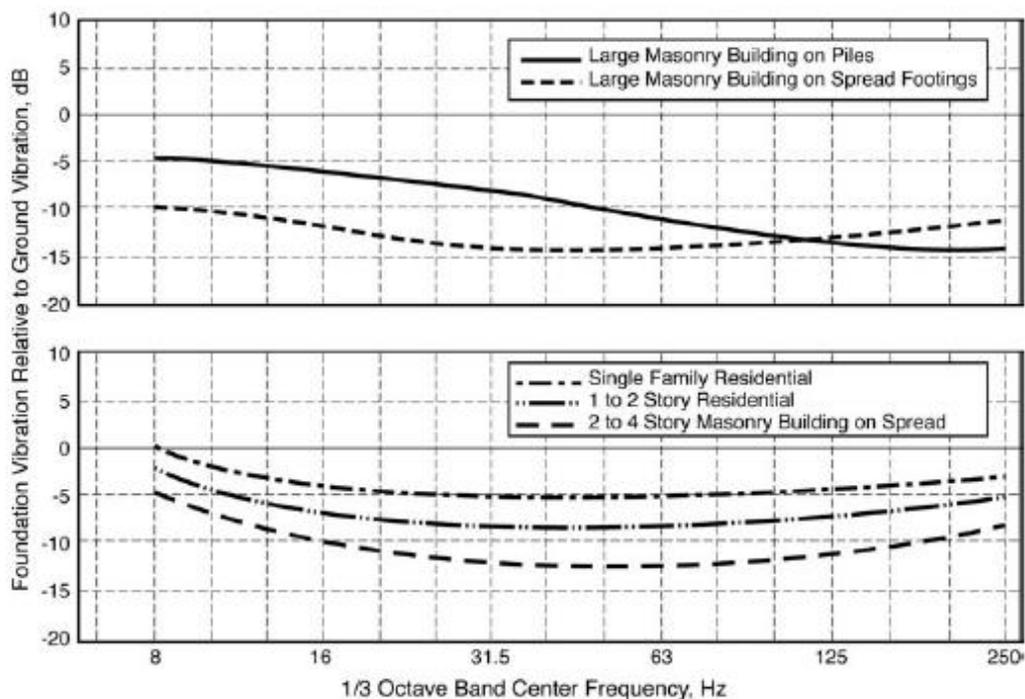


Figura 4-1 Risposta delle fondazioni per diverse tipologie di edifici (Fonte: FTA, USA)

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.

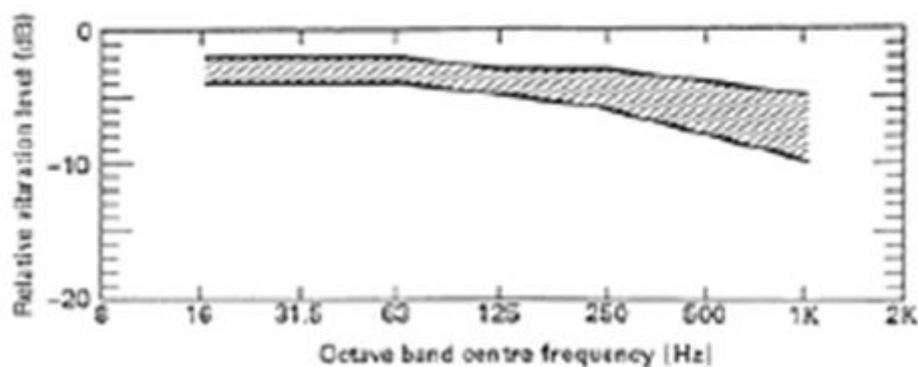


Figura 4-2 Attenuazione delle vibrazioni nel passaggio da un piano al successivo

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). È comune che pavimento amplifichi nella gamma 10 – 30 Hz poichè a quelle frequenze le risonanze della struttura coincidono con i picchi di vibrazione prodotti dal transito del treno.

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

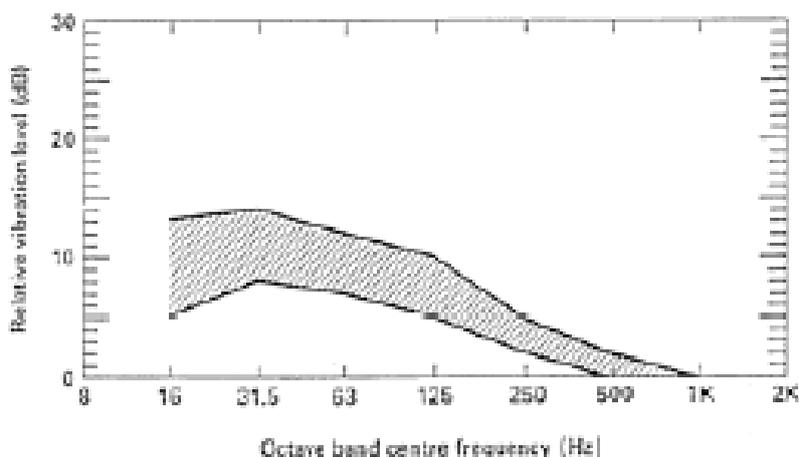


Figura 4-3 Amplificazione prodotta dai solai

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.

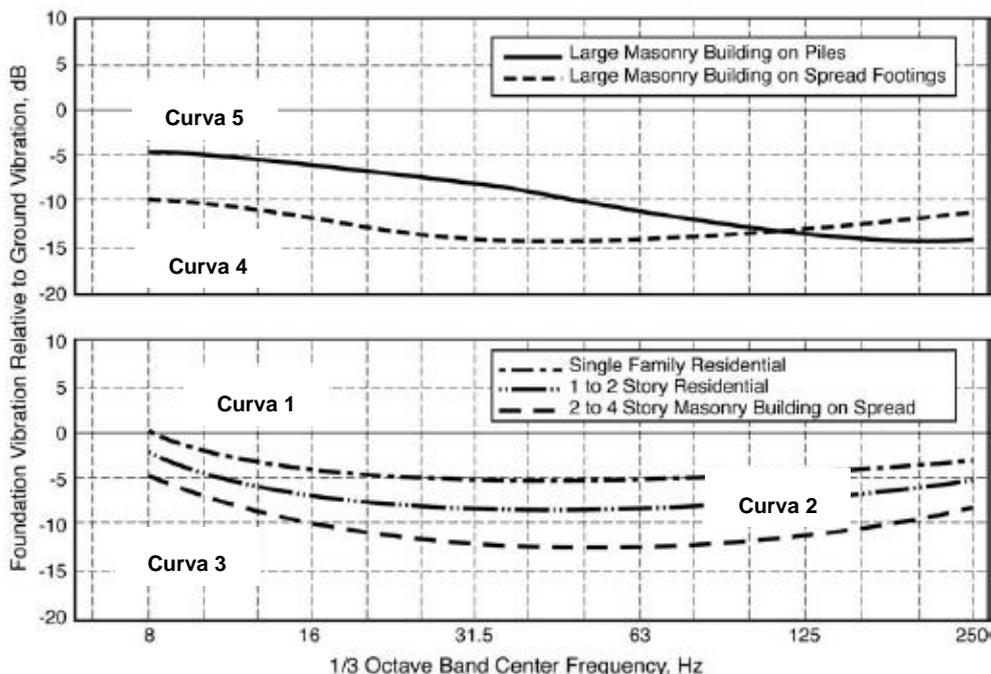


Figura 4-4 Fattori correttivi dovuti alla tipologia di fondazione

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	QUADRUPPLICAMENTO CIAMPINO-CAPANNELLE E PRG CIAMPINO 2^ FASE LATO ROMA ELABORATI A CARATTERE GENERALE PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA NR45	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM 00 04 002	REV. A

Le tipologie edilizie prevalenti in adiacenza al tracciato sono rappresentate da edifici storici in muratura, con fondazioni direttamente immorsate nel terreno e edifici di recente edificazione con ossatura in cemento armato e fondazioni continue. In queste condizioni, sulla base di quanto sin ora detto, la differenza tra il livello di vibrazione all'interno della totalità degli edifici si stima cautelativamente pari a **+5 dB** rispetto al livello al terreno.

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.

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



QUADRUPPLICAMENTO CIAMPINO-CAPANNELLE E PRG CIAMPINO
2^ FASE LATO ROMA

ELABORATI A CARATTERE GENERALE

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA

STUDIO VIBRAZIONALE

Relazione Generale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NR45	00	R 22 RG	IM 00 04 002	A	32 di 40

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	QUADRUPPLICAMENTO CIAMPINO-CAPANNELLE E PRG CIAMPINO 2^ FASE LATO ROMA ELABORATI A CARATTERE GENERALE PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA NR45	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM 00 04 002	REV. A

5 LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO

5.1 PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO

L'individuazione delle criticità che si potranno verificare con la realizzazione del progetto ha reso indispensabile determinare preventivamente i criteri di valutazione della sensibilità del territorio: a tale scopo è stato utilizzato come riferimento il censimento dei ricettori eseguito nell'ambito dello studio acustico. Per quanto riguarda l'individuazione di criticità, 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 (punto A.4 della Appendice) nel caso di vibrazioni prodotte da veicoli ferroviari (89,5 dB per asse Z; 86,7 dB per assi X-Y).

Applicando i modelli di calcoli precedentemente descritti, le funzioni di trasferimento sperimentali e attraversamenti litologici tipici dell'area in esame, i dati di caratterizzazione dei singoli transiti massimi e medi e tipologie edilizie sia in c.a. sia in muratura, 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).

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, sono invece da confrontare con i livelli dei singoli transiti, distinti per tipologia di convoglio, adottando come intervallo di tempo rappresentativo la durata dell'evento, in caso di tracciato in sotterraneo. Si fa presente che tuttavia il tracciato di progetto in questo caso si sviluppa interamente allo scoperto.

5.2 TRAFFICO DI ESERCIZIO

Il numero di transiti considerati per la valutazione previsionale del disturbo da vibrazioni si basa sul modello di esercizio futuro individuato nell'ambito del progetto e riferito alle linee Roma-Cassino e Roma-Castelli Romani. Per quanto riguarda le velocità di percorrenza si fa riferimento a quanto previsto allo stato attuale per la linea Roma-Ciampino nella tratta ricadente all'interno dell'ambito di studio. Nello specifico:

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

Linea Roma-Cassino	REGIONALI		MERCÌ		LP		TOTALE	
	D	N	D	N	D	N	tot D	tot N
Scenario di riferimento di esercizio di progetto								
Treni REG Vivalto, Rock 6 casse	70	-	-	-	-	-	70	-
Treni LP	-	-	-	-	15	-	15	-
Treni MERCÌ PC80	-	-	15	15	-	-	30	-
Totale	70	-	15	15	15	-	115	-

Tabella 5-1 Modello di esercizio linea Roma Cassino

Linea Roma- Castelli romani	REGIONALI		MERCÌ		LP (EC/EN)		TOTALE	
	D	N	D	N	D	N	tot D	tot N
Scenario di riferimento di esercizio di progetto								
Treni REG Jazz, Vivalto, Rock 6 casse	70	-	-	-	-	-	70	-
Totale	70	-	-	-	-	-	70	-

Tabella 5-2 Modello di esercizio linea Roma-Castelli Romani

5.3 LIVELLI COMPLESSIVI

5.3.1 Individuazione dei livelli di vibrazione

Le accelerazioni complessivamente prodotte dall'esercizio della linea ferroviaria di progetto sono fornite dall'applicazione dell'emissione delle singole tipologie di treno e verso di percorrenza al traffico di esercizio previsto, in riferimento alle postazioni di indagine effettuate e tenendo conto del tempo di esposizione medio per tipologia di treno. Nelle tabelle seguenti si evincono per i tre assi di

riferimento X, Y e Z e nelle tre postazioni P1, P2 e P3 di riferimento il valore complessivo di esposizione nel periodo diurno e nel periodo notturno calcolato sulla base del modello di esercizio atteso. Il calcolo è stato effettuato per ciascuna sezione di studio individuata precedentemente in relazione al layout della rete ferroviaria, del numero e tipologia di transiti per singola tratta, della velocità di percorrenza e della possibile presenza di fenomeni di sovrapposizione degli effetti con le due linee storiche di raccordo. Inoltre, è stato considerato un fattore di correzione per tener conto della differenza tra il livello vibrazionale nel terreno e quello all'interno dell'edificio che, nel caso specifico, per le motivazioni descritte nel capitolo precedente si stima essere cautelativamente di +5 dB.

La valutazione è eseguita sia considerando l'intero modello di esercizio nell'arco delle 24 ore, differenziando le analisi tra periodo diurno e notturno e considerando i valori emissivi medi per ciascuna tipologia di convoglio.

5.3.2 Livello di emissione complessivo

Per la determinazione dei livelli di emissione complessivi si è fatto riferimento 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.

Il contributo energetico associato all'intero modello di esercizio è stato poi rapportato all'intero periodo diurno e notturno. Si ribadisce che le analisi sono state differenziate in funzione della tipologia di edificio applicando un fattore correttivo di +5 dB per tener conto della possibile amplificazione della vibrazione all'interno delle strutture. Le distanze sono da intendersi dall'asse della piattaforma ferroviaria (asse mediana).

Ricettori – ambienti interni							
Posizione	Dist. da asse	Lw,eq [dB] Diurno			Lw,eq [dB] Notturno		
		Asse Z	Asse X	Asse Y	Asse Z	Asse X	Asse Y
P1	15 m	65,3	67,7	68,6	58,7	61,6	61,4
P2	20 m	59,5	63,9	63,0	52,1	55,2	55,5
P3	25 m	56,5	59,9	58,3	49,2	51,2	51,0

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

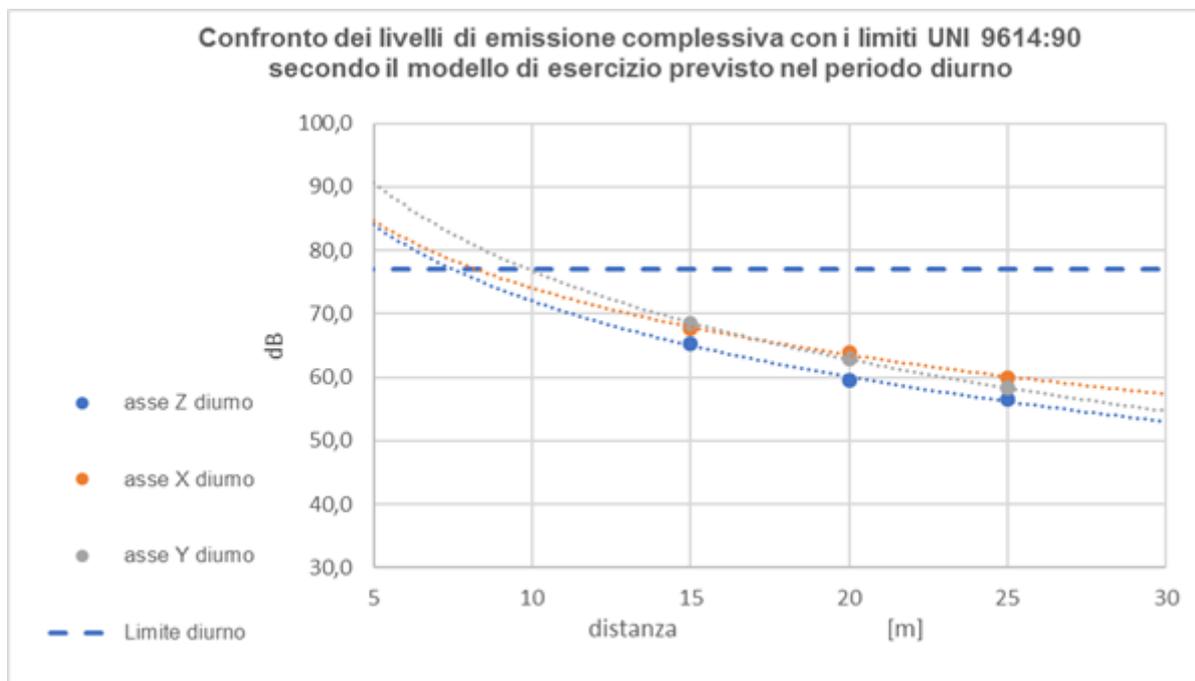


Figura 5-1 Confronto dei livelli di emissione complessiva all'interno degli edifici con i limiti UNI 9614:1990 in funzione della distanza da asse secondo il modello di esercizio previsto nel periodo diurno

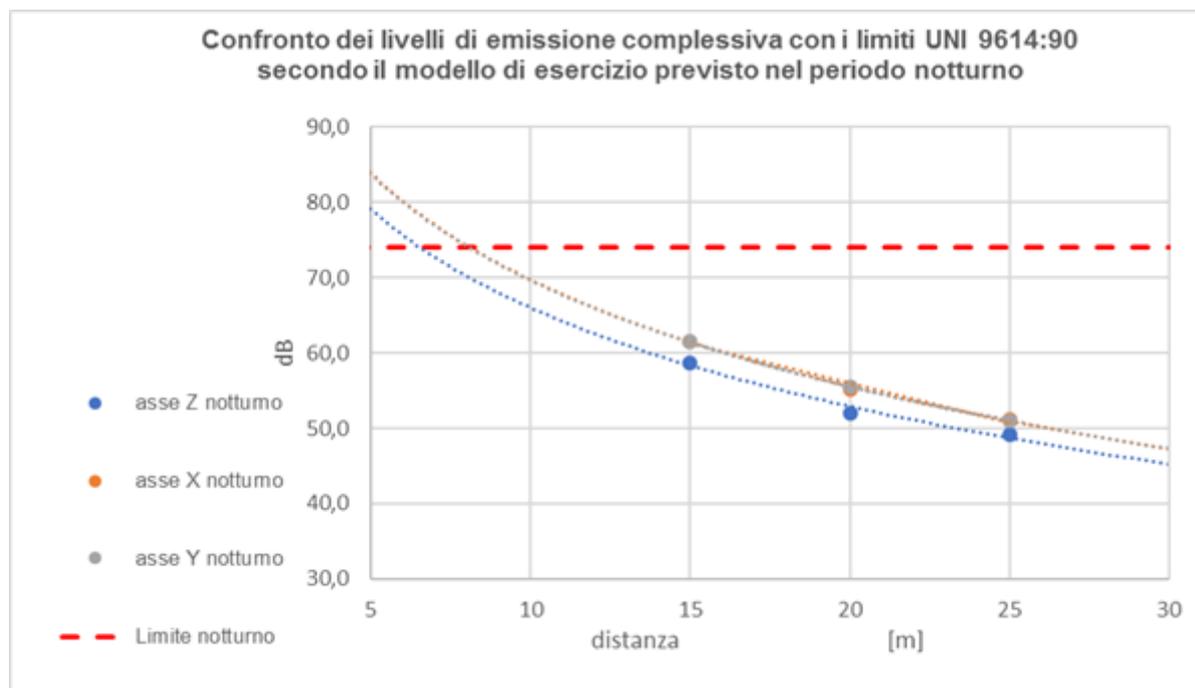


Figura 5-2 Confronto dei livelli di emissione complessiva all'interno degli edifici con i limiti UNI 9614:1990 in funzione della distanza da asse secondo il modello di esercizio previsto nel periodo notturno

Considerando quindi i livelli di emissione complessivi, dall'applicazione del modello previsionale individuato, si evince che i livelli limite nei due periodi di riferimento, per gli ambienti interni alle abitazioni nei due periodi temporali di riferimento vengono raggiunti alle distanze riportate in Tabella 5-4:

	Edifici – ambienti interni	
	D [m] Periodo diurno	D [m] Periodo notturno
Asse Z	8	7
Asse X	9	9
Asse Y	10	9

Tabella 5-4 Distanze livelli limite periodo diurno e notturno sugli assi x, y e z

Per quanto concerne il tratto ferroviario della linea in studio in prossimità della stazione di Ciampino, in virtù della maggiore distanza intercorrente i fasci di binari delle linee e la presenza di ricettori residenziali prospicienti la linea, l'analisi è stata differenziata ipotizzando cautelativamente di suddividere il traffico previsto dal modello di esercizio sull'asse mediana dei binari di corsa più esterni.

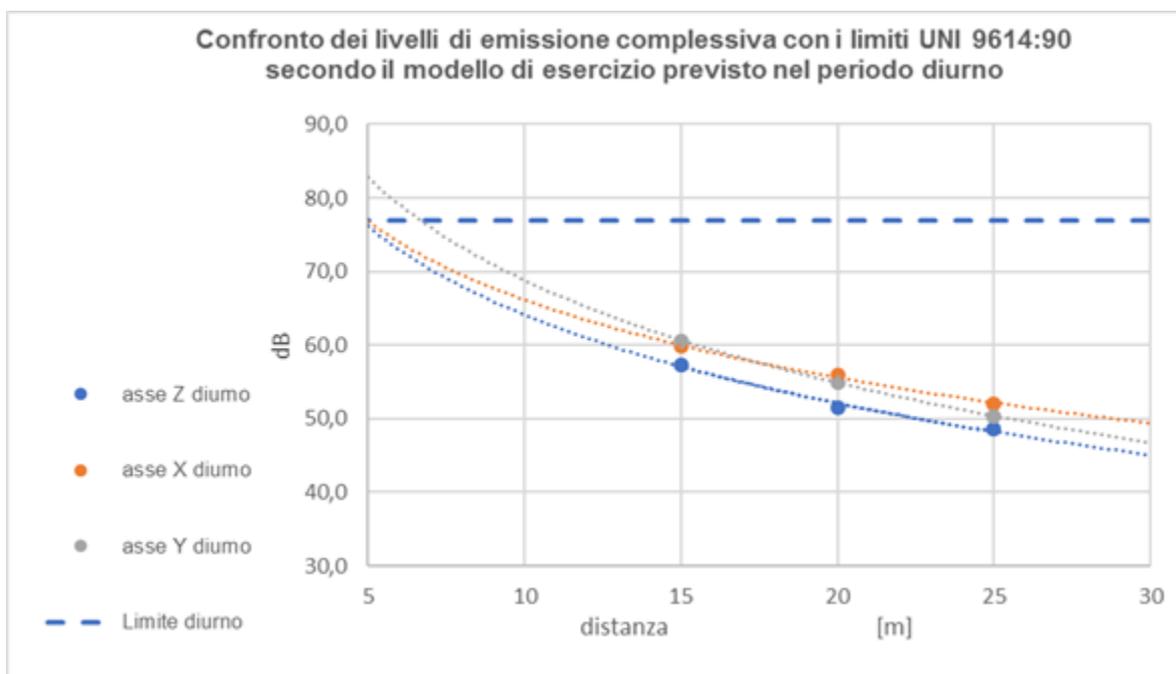


Figura 5-3 Confronto dei livelli di emissione complessiva all'interno delle strutture con i limiti UNI 9614:1990 in funzione della distanza secondo il modello di esercizio previsto nel periodo diurno in prossimità della stazione di Ciampino

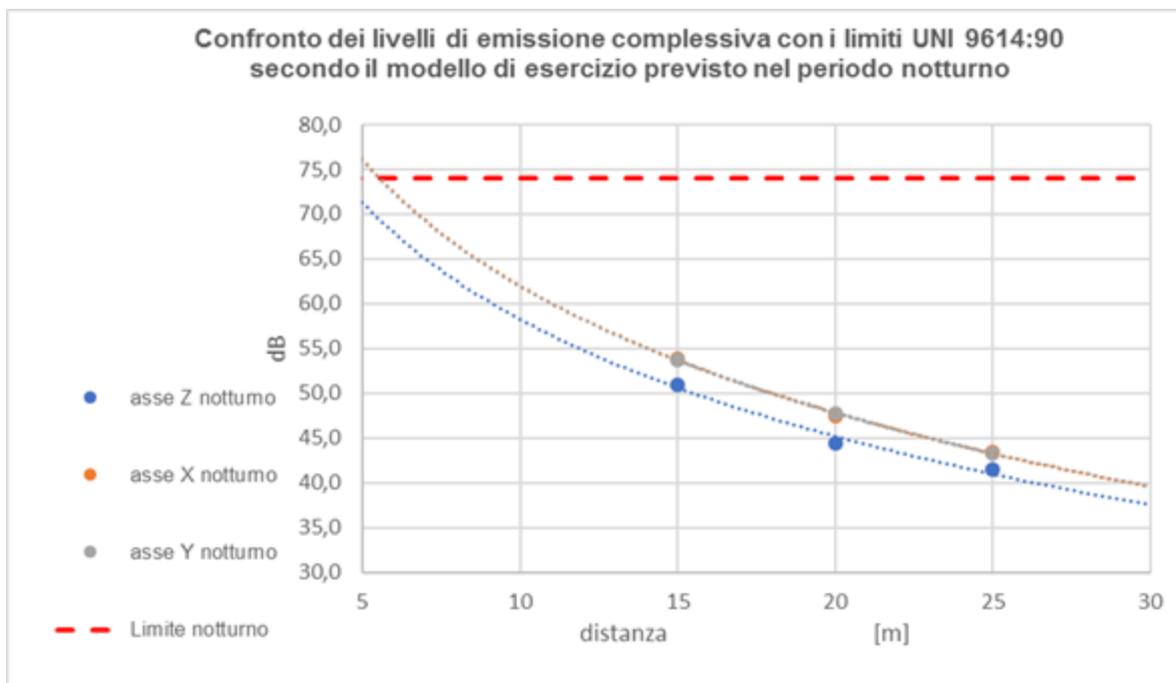


Figura 5-4 Confronto dei livelli di emissione complessiva all'interno delle strutture con i limiti UNI 9614:1990 in funzione della distanza secondo il modello di esercizio previsto nel periodo notturno in prossimità della stazione di Ciampino

Considerando quindi i livelli di emissione complessivi, dall'applicazione del modello previsionale individuato, si evince che i livelli limite nei due periodi di riferimento, per gli ambienti interni alle abitazioni poste in prossimità della stazione di Ciampino nel periodo vengono raggiunti alle distanze riportate in Tabella 5-4:

	Edifici – ambienti interni	
	D [m]	D [m]
	Periodo diurno	Periodo notturno
Asse Z	5	5
Asse X	6	6
Asse Y	7	6

Tabella 5-5 Distanze livelli limite periodo diurno e notturno sugli assi x, y e z

	QUADRUPPLICAMENTO CIAMPINO-CAPANNELLE E PRG CIAMPINO 2^ FASE LATO ROMA ELABORATI A CARATTERE GENERALE PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA NR45	LOTTO 00	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM 00 04 002	REV. A	FOGLIO 39 di 40

5.4 INDIVIDUAZIONE DELLE POTENZIALI AREE CRITICHE

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

Tenendo conto del numero complessivo di transiti ferroviari previsti secondo i valori emissivi medi riscontrati nelle indagini sperimentali distinti per tipologia di treno e rapportando i livelli di accelerazione complessiva all'intero periodo diurno e notturno, dall'applicazione del modello previsionale non si individuano infatti condizioni di criticità e quindi aree potenzialmente oggetto di disturbo da vibrazioni indotte dal traffico ferroviario lungo le linee di Roma - Cassino e Roma - Castelli Romani. Il fenomeno vibratorio di potenziale disturbo rimane circoscritto all'interno della piattaforma ferroviaria stessa, annullandosi già ai piedi del rilevato.

Sulla base di quanto detto quindi non sono state individuate aree critiche.

6 CONCLUSIONI

Il presente studio ha avuto come scopo l'individuazione delle problematiche di propagazione delle vibrazioni indotte dal traffico ferroviario lungo le linee di Roma – Cassino e Roma – Castelli Romani nell'ambito del progetto di adeguamento del Piano regolatore di gestione della stazione di Ciampino e del progetto relativo al quadruplicamento della linea Roma - Ciampino.

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 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 la linea Roma – Cassino. Dall'analisi dei dati di accelerazione rilevati nel periodo di misura sono stati individuati i livelli di accelerazione in dB associati alle condizioni di media emissione dedotte dall'analisi statistica dell'intero numero di convogli campionati. Inoltre, dai livelli di accelerazione rilevati nelle tre postazioni di misura è stata determinata la legge di propagazione delle onde vibrazionali nel terreno specifica al contesto territoriale in studio. Inoltre, in riferimento alla valutazione interna degli edifici è stato considerato un incremento dei livelli di emissione di +5 dB rispetto al livello calcolato al terreno. Le caratteristiche degli edifici sono state individuate dal censimento dei ricettori eseguito nell'ambito dello studio acustico.

L'algoritmo di calcolo così definito è stato quindi applicato al modello di esercizio previsto per l'individuazione delle aree critiche, ovvero per i ricettori cui si stima un livello di accelerazione superiore a quello di riferimento previsto dalla norma UNI 9614:1990 (77 dB diurno, 74 dB notturno). La verifica è stata effettuata per lo scenario di disturbo complessivo determinando i livelli di accelerazione indotti dal modello di esercizio previsto e riferiti all'intero periodo temporale diurno e notturno. In tale condizione, considerando i valori di emissione media determinati dall'analisi statistica dei campionamenti effettuati, emerge una condizione di pieno rispetto dei valori di accelerazione in corrispondenza degli edifici residenziali ubicati lungo la linea ferroviaria.

In termini complessivi non sono state quindi individuate tratte critiche sia per il periodo diurno, sia per quello notturno. I livelli di accelerazione indotti dal traffico ferroviario in corrispondenza degli edifici residenziali posti lungo la linea all'interno dell'ambito di studio sono al di sotto di quelli indicati dalla norma UNI 9614:1990 come riferimento per la valutazione del disturbo da vibrazioni.