

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



CUP J14J22000350001

S.O. AMBIENTE

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA
Lotto 2

STUDIO VIBRAZIONALE

Relazione Generale

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.
R R 0 P 0 2 R 2 2 R G I M 0 0 0 4 0 0 2 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	G. Pettinelli 	Marzo 2023	A. Lombardo 	Marzo 2023	T. Paoletti 	Marzo 2023	C. Ercolani Marzo 2023

File: RR0P02R22RGIM0004002A.doc

n. Elab.:

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2</p> <p>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE</p>												
<p>STUDIO VIBRAZIONALE</p> <p>Relazione generale</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RR0P</td> <td>02 R 22</td> <td>RG</td> <td>IM0004.002</td> <td>A</td> <td>2 di 49</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RR0P	02 R 22	RG	IM0004.002	A	2 di 49
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RR0P	02 R 22	RG	IM0004.002	A	2 di 49								

Indice

1	INTRODUZIONE.....	4
2	RIFERIMENTI NORMATIVI	7
2.1	ASPETTI GENERALI NORMATIVI	7
2.2	LA NORMATIVA TECNICA DI RIFERIMENTO.....	7
3	AREA DI STUDIO.....	14
3.1	INQUADRAMENTO TERRITORIALE	14
3.2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	15
4	INDAGINI VIBRAZIONALI	17
4.1	RILIEVI DI VIBRAZIONI IN SITU	17
4.2	ANALISI DEI RILIEVI.....	19
4.2.1	<i>Entità vibrazionale e relativa variabilità dei transiti ferroviari.....</i>	19
4.2.2	<i>Caratteristiche di emissione delle vibrazioni di origine ferroviaria</i>	19
5	LO STUDIO DELLE VIBRAZIONI	22
5.1	LE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO	22
5.2	CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE DI VIBRAZIONI	23
5.2.1	<i>Interazione ruota-rotaia</i>	23
5.2.2	<i>Velocità dei treni.....</i>	25
5.2.3	<i>Corpo ferroviario</i>	25
5.2.4	<i>La propagazione delle vibrazioni nel terreno</i>	26
5.3	LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NELLE STRUTTURE EDILIZIE.....	34
5.3.1	<i>Risposta degli edifici alle vibrazioni</i>	34
5.3.2	<i>Accoppiamento terreno – fondazioni edificio</i>	35
5.3.3	<i>Trasmissione attraverso l'edificio.....</i>	37
5.3.4	<i>Risonanze strutturali dei solai.....</i>	37
5.3.5	<i>Individuazione delle vibrazioni trasmesse a ciascun edificio e stima della risposta</i>	39
5.3.6	<i>Rumore trasmesso per via solida dalle strutture.....</i>	40
5.4	IL MODELLO PREVISIONALE PER L'ANALISI DELLE VIBRAZIONI	41
6	LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO	41
6.1	ANALISI PREVISIONALE IN FASE DI ESERCIZIO.....	41
6.2	TRAFFICO DI ESERCIZIO	42
6.3	LIVELLI VIBRAZIONALI INDOTTI	44

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2</p> <p>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE</p>												
<p>STUDIO VIBRAZIONALE</p> <p>Relazione generale</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RR0P</td> <td>02 R 22</td> <td>RG</td> <td>IM0004.002</td> <td>A</td> <td>3 di 49</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RR0P	02 R 22	RG	IM0004.002	A	3 di 49
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RR0P	02 R 22	RG	IM0004.002	A	3 di 49								

6.3.1	<i>Determinazione dei livelli vibrazionali indotti.....</i>	44
6.3.2	<i>Intero modello di esercizio.....</i>	45
6.4	DETERMINAZIONE DELLA FASCIA DI POTENZIALE DISTURBO	45
6.4.1	<i>Intero modello di esercizio.....</i>	45
6.4.2	<i>Individuazione della fascia di disturbo da vibrazioni.....</i>	47
6.5	DETERMINAZIONE DELLA FASCIA DI POTENZIALE DISTURBO	47
7	CONCLUSIONI.....	48

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 4 di 49

1 INTRODUZIONE

Il presente elaborato contiene i risultati dello studio vibrazionale previsionale relativo alle potenziali interferenze in termini di disturbo sui ricettori indotte dall'esercizio della linea ferroviaria di progetto.

Lo studio di impatto vibrazionale è stato condotto secondo quanto previsto dal Manuale di Progettazione delle Opere Civili di RFI (RFIDTCSIAMMAIFS001E del 31.12.2022). Le vibrazioni sono in grado di determinare effetti indesiderati sulla popolazione esposta e sugli edifici. Il disturbo sulle persone, classificato come annoyance, dipende in misura variabile dall'intensità e frequenza dell'evento disturbante e dal tipo di attività svolta. Le vibrazioni possono causare danni agli edifici in alcune situazioni, o in presenza di caratteristiche di estrema suscettività strutturale o di elevati e prolungati livelli di sollecitazione dinamica. 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.

L'analisi vibrazionale è quindi finalizzata alla verifica dell'entità del disturbo in corrispondenza degli edifici posti lungo la linea ferroviaria secondo i criteri indicati dalla norma UNI9614. In questo caso lo studio è stato così articolato:

- Individuazione dell'ambito di studio e dei livelli di riferimento. Gli effetti delle vibrazioni di origine ferroviaria associati al transito di convogli lungo la linea di studio hanno in linea generale una valenza entro i 50 m dal binario. Si è definito quindi un ambito di studio di ampiezza pari a 50 m per lato all'interno del quale sono stati individuati i potenziali edifici oggetto di disturbo sulla scorta del censimento ricettori dello studio acustico.

Le vibrazioni ferroviarie sono considerate come vibrazioni a livello non costante secondo la definizione indicata dalla norma UNI9614:1990. Per quanto concerne i livelli di riferimento per la valutazione del disturbo all'interno degli edifici si è fatto riferimento a quanto previsto dalla norma UNI9614 in appendice A.2, ovvero ai valori di accelerazione equivalente ponderata in frequenza o i corrispondenti livelli riportati nei prospetti II e III nel periodo diurno e notturno. Considerando la condizione di postura non nota si è fatto riferimento al valore soglia più restrittivo, ovvero 77 dB nel periodo diurno e 74 dB in quello notturno, seppur la stessa norma indichi nell'appendice A.4 come soglia di riferimento per il caso ferroviario i valori di 89 dB per l'asse Z e 86,7 dB per gli assi X e Y.

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 5 di 49

- Indagine sperimentale in situ. È stata effettuata una campagna di misura con il duplice scopo di caratterizzare sia la sorgente ferroviaria secondo le diverse tipologie/composizioni dei convogli ferroviari (ES*, REG, IC, etc.) sia le modalità di propagazione delle onde vibrazionali nel terreno secondo il contesto geologico, naturale ed antropico dell'ambito di studio. Il campionamento in corrispondenza di più terne accelerometriche poste a distanze crescenti lungo l'asse trasversale del binario ha permesso infatti di determinare sperimentalmente la funzione di propagazione delle onde vibrazionali che dipende, oltre che dalla tipologia di sorgente, anche dalle condizioni geologiche che costituiscono il terreno tra ferrovia e ricettori e dalla tipologia di ricettore in termini di struttura e numero di piani.
- Livelli vibrazionali indotti allo scenario di progetto. Applicando il modello di propagazione delle vibrazioni sulla scorta delle indagini sperimentali eseguite e considerando il modello di esercizio di progetto previsto per la linea ferroviaria in studio è stato determinato il contributo vibrazionale indotto sul territorio contermini. È stata considerata inoltre l'applicazione di un ulteriore fattore cautelativo di +5dB per tener conto della possibile amplificazione dell'onda vibrazionale all'interno degli edifici funzione delle caratteristiche strutturali dell'involucro edilizio.

L'analisi previsionale è stata differenziata per le diverse tratte ferroviarie considerando l'intero modello di esercizio previsto per i due periodi temporali di riferimento e i relativi livelli vibrazionali indotti rapportati al periodo diurno e notturno.

- Individuazione delle aree di potenziale disturbo. Considerando i valori di riferimento per la valutazione del disturbo (77 dB nel periodo diurno, 74 dB nel periodo notturno), dall'applicazione del modello previsionale sperimentale si è determinata la distanza rispetto all'asse del binario alla quale i livelli di accelerazione sono pari ai suddetti valori lungo gli assi X, Y e Z. Considerando la condizione più critica (asse più critico, ovvero distanza maggiore) si determina l'ampiezza della fascia di potenziale disturbo e, quindi, i ricettori per i quali i livelli di accelerazione risultano superiori a quelli di riferimento per la valutazione del disturbo da vibrazioni. Per questi il calcolo viene esteso al livello puntuale in modo da determinare anche il valore residuo del disturbo.

E' opportuno sottolineare come l'approccio utilizzato tenga conto di condizioni al contorno più severe di quelle che si verificheranno con la realizzazione dell'opera ferroviaria in quanto il modello

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 6 di 49

sperimentale implementato sulla base di indagini sperimentali in situ tiene conto di un armamento ferroviario esistente (meno levigato rispetto ad uno nuovo), di un parco ferroviario circolante meno performante (i treni di ultima generazione sono caratterizzati da una minor emissione vibrazionale) e di fattori cautelativi legati ai possibili fenomeni di propagazione/amplificazione delle vibrazioni nel terreno e nelle strutture.

Lo studio vibrazionale è costituito dai seguenti elaborati:

Elaborato	Cod.	Scala
Relazione generale	RR0P02R22RGIM0004002A	-
Report misure vibrazionali	RR0P02R22RHIM0004002A	-

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 7 di 49

2 RIFERIMENTI NORMATIVI

2.1 Aspetti generali normativi

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".

2.2 La normativa tecnica di riferimento

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

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A

le curve approssimate di uguale risposta in termini di disturbo, rispettivamente per le accelerazioni riferite all'asse Z, agli assi X, Y e alla combinazione dei tre assi.

L'Annex A della ISO 2631-2 (che non rappresenta peraltro parte integrale della norma) fornisce informazioni sui criteri di valutazione della risposta soggettiva alle vibrazioni; in pratica sono riportati i fattori di moltiplicazione da applicare alle curve base delle accelerazioni e delle velocità al variare del periodo di riferimento (giorno e notte), del tipo di vibrazione (vibrazioni continue o intermittenti, vibrazioni transitorie) e del tipo di insediamento (ospedali, laboratori di precisione, residenze, uffici, industrie). Le vibrazioni devono essere misurate nel punto di ingresso nel corpo umano e deve essere rilevato il 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/s²]	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

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 9 di 49

Tabella 2-1 Valori di soglia di vibrazione relativi al disturbo alle persone nel periodo notturno (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

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 10 di 49

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 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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A

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 ($f = 1\text{Hz}$) a 40 ($f=50\text{Hz}$)	Varia linearmente da 40 ($f = 1\text{Hz}$) a 50 ($f=50\text{Hz}$)	40	20
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

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p align="center">RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2</p> <p align="center">PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE</p>												
<p>STUDIO VIBRAZIONALE</p> <p>Relazione generale</p>	<table border="1"> <tr> <td>COMMESSA</td> <td>LOTTO</td> <td>CODIFICA</td> <td>DOCUMENTO</td> <td>REV.</td> <td>FOGLIO</td> </tr> <tr> <td>RR0P</td> <td>02 R 22</td> <td>RG</td> <td>IM0004.002</td> <td>A</td> <td>12 di 49</td> </tr> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RR0P	02 R 22	RG	IM0004.002	A	12 di 49
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RR0P	02 R 22	RG	IM0004.002	A	12 di 49								

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:

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE												
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">COMMESSA</td> <td style="text-align: center;">LOTTO</td> <td style="text-align: center;">CODIFICA</td> <td style="text-align: center;">DOCUMENTO</td> <td style="text-align: center;">REV.</td> <td style="text-align: center;">FOGLIO</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">RR0P</td> <td style="text-align: center;">02 R 22</td> <td style="text-align: center;">RG</td> <td style="text-align: center;">IM0004.002</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">13 di 49</td> </tr> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RR0P	02 R 22	RG	IM0004.002	A	13 di 49
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RR0P	02 R 22	RG	IM0004.002	A	13 di 49								

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

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 14 di 49

3 AREA DI STUDIO

3.1 Inquadramento territoriale

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

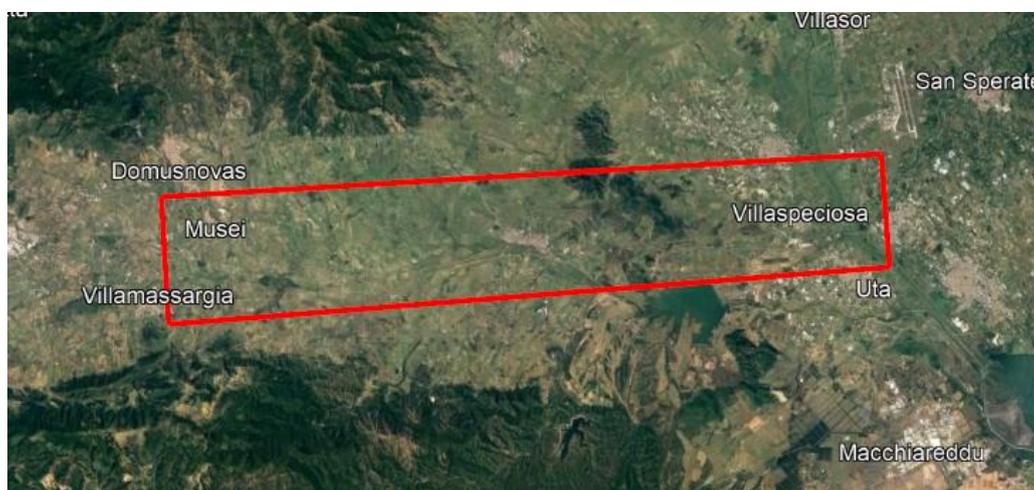


Figura 3-1 Vista aerea dell'inquadramento generale dell'intervento oggetto di studio

L'intervento in oggetto ricade nell'ambito del raddoppio della linea ferroviaria Decimomannu-Villamassargia (Lotto 2).

Il territorio attraversato è caratterizzato da un tessuto residenziale discontinuo con prevalenza di aree agricole.

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A

3.2 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.

La carta in Figura 3-2, evidenzia come l'area di progetto ricada prevalentemente in un'area interessata da depositi alluvionali.

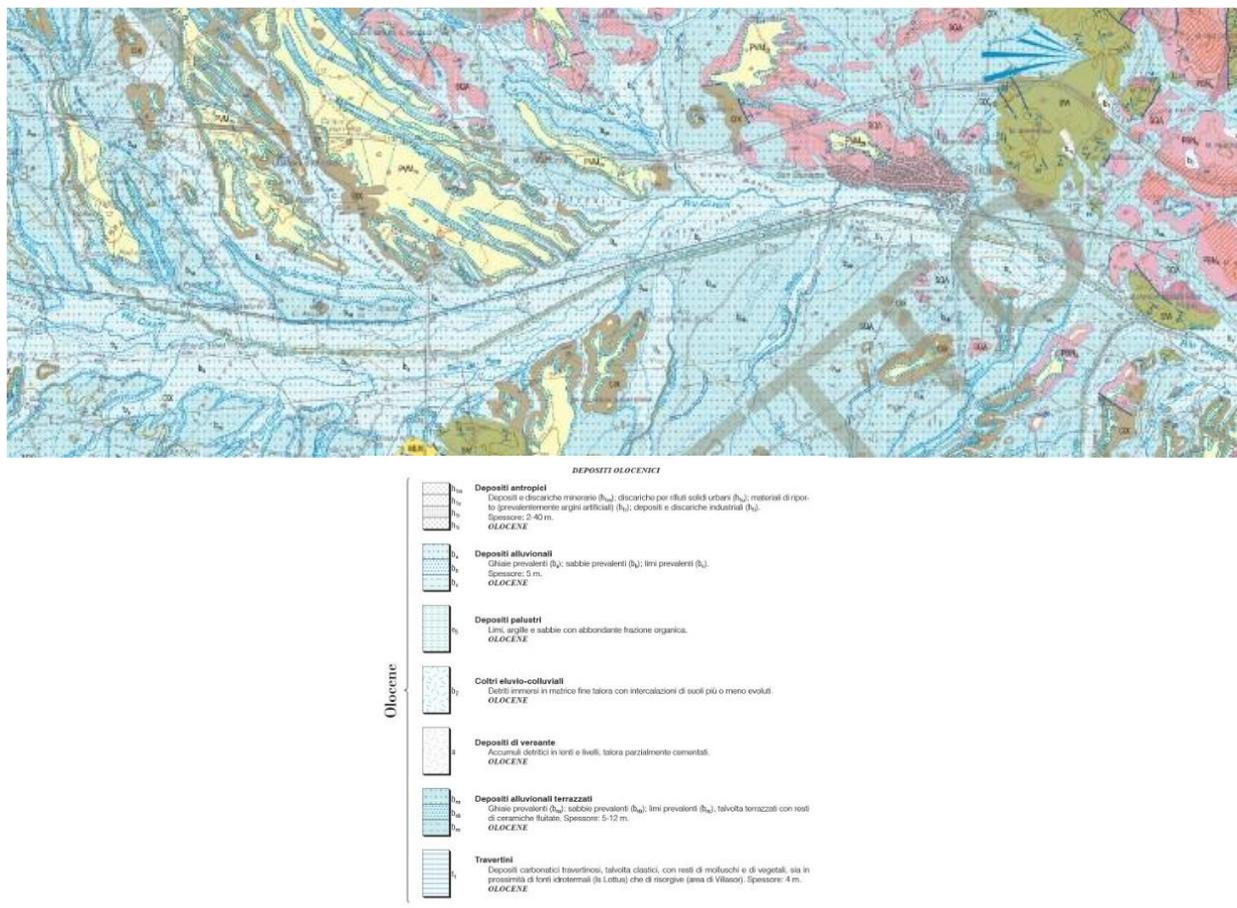


Figura 3-2 Stralcio carta geologia

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A

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]
Sabbia, limo, ghiaia, loess	600	0,1	1600
Argilla, suolo argilloso	1500	0,1 – 0,2	1700

La classificazione ai fini vibrazionali è indicata nella seguente tabella.

Simbologia stratigrafica	Descrizione	Velocità di propagazione delle onde longitudinali [m/s]	Fattore di smorzamento	Densità [kg/m ²]
Aa	Terreno prevalentemente sabbioso, con eventuale presenza di limo, ghiaia, loess	600	0,1	1600

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 17 di 49

4 INDAGINI VIBRAZIONALI

4.1 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 posta lungo la linea ferroviaria Decimomannu-Villamassargia (punto VIB01) in un tratto che si sviluppa a raso. Le misure sono state eseguite secondo le modalità indicate dalla norma UNI 9614:1990, come indicato dal Manuale di Progettazione RFI delle Opere Civili cod. RFIDTCSIAMMAIFS001E del 30.12.2022. Lungo la via di propagazione sono stati posizionati tre vibrometri, ciascuno dotato di tre accelerometri (uno per ciascun asse di riferimento).

Si rimanda all'elaborato "*Report delle misure vibrazionali*" (Cod. RR0P02R22RHIM0004001A) per il dettaglio della metodica di misura, posizione strumentazione e dettaglio dei dati sperimentali rilevati in corrispondenza di ciascuna terna accelerometrica ed evento ferroviario disturbante.

I punti di misura sono stati posizionati in terreni appartenenti alla pertinenza esterna di abitazioni private situate ai margini della linea ferroviaria, così come indicato nei sottostanti stralci planimetrici riportati nelle figure seguenti.

Presso tale sezione sono state posizionate tre terne accelerometriche T1, T2 e T3 così posizionate rispetto alla linea ferroviaria:

- Terna 1: distante 4 metri dall'asse binario esterno;
- Terna 2: distante 8 metri dall'asse binario esterno;
- Terna 3: distante 12 metri dall'asse binario esterno.

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE												
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RR0P</td> <td>02 R 22</td> <td>RG</td> <td>IM0004.002</td> <td>A</td> <td>18 di 49</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RR0P	02 R 22	RG	IM0004.002	A	18 di 49
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RR0P	02 R 22	RG	IM0004.002	A	18 di 49								

AREA DI INDAGINE	POSTAZIONI DI MISURA
	

Tabella 4-1 Localizzazione delle indagini vibrazionali lungo l'attuale linea ferroviaria Decimomannu-Villamassargia (VIB_01)

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).

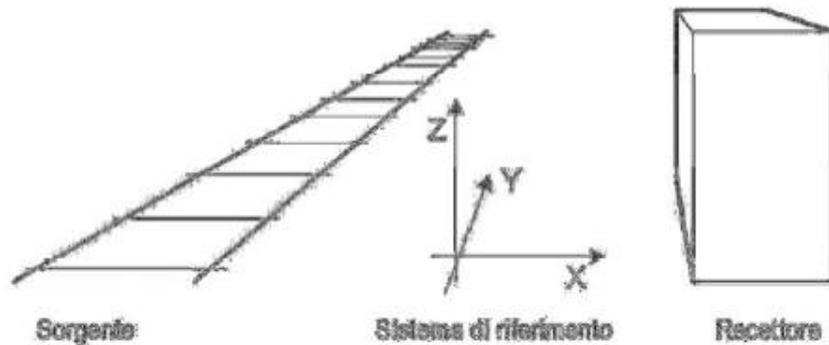


Figura 4-1 Orientamento delle componenti vibrazionali rispetto alle sorgenti

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 19 di 49



Figura 4-2 Esempio di installazione dell'accelerometro

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.

4.2 Analisi dei rilievi

4.2.1 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 di misura relativo sono stati campionati i livelli di accelerazione relativi a 34 treni effettivi Regionali.

4.2.2 Caratteristiche di emissione delle vibrazioni di origine ferroviaria

Dai dati sperimentali rilevati in corrispondenza della terna T1 si caratterizza l'emissione vibrazionale della sorgente ferroviaria, ovvero lo spettro emissivo in bande di frequenza del transito di un singolo convoglio ferroviario. In corrispondenza della sezione 1 (Terna 1) dall'analisi statistica dei dati rilevati si evidenzia come l'emissione vibrazionale è caratterizzata da energia concentrata fra 30 e 80 Hz.

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A

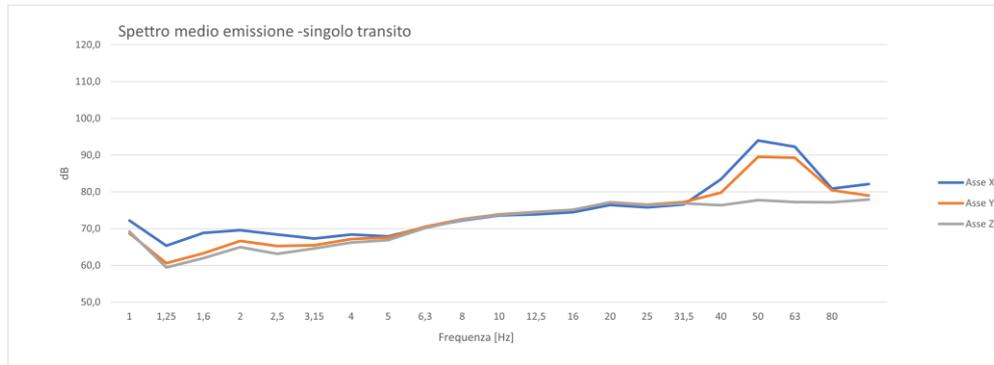


Figura 4-3 Spettro medio dei transiti rilevati presso la postazione T1 in prossimità del binario

Per ciascun evento ferroviario osservato durante il periodo di misura, si determina il valore dei livelli di accelerazione $L_{w,eq}$ lungo gli assi X, Y e Z. Da una analisi statistica dei dati misurati si determinano i livelli di accelerazione medi per gli assi X, Y e Z per ciascuna categoria di convoglio.

Cat.	Postazione	Vel. Media [km/h]	Durata media [s]	Lw,eq media [dB]		
				X	Y	Z
Reg	T1 (4 m da binario)	70	10,6	82,1	79,1	78,0
	T2 (8 m da binario)			77,4	77,7	75,8
	T3 (12 m da binario)			64,0	66,5	67,2

Tabella 4-2 Livelli di accelerazione $L_{w,eq}$ in dB riferiti ad un singolo transito di un convoglio della tipologia Regionale nella condizione di media emissione rilevati in corrispondenza dei punti T1, T2 e T3.

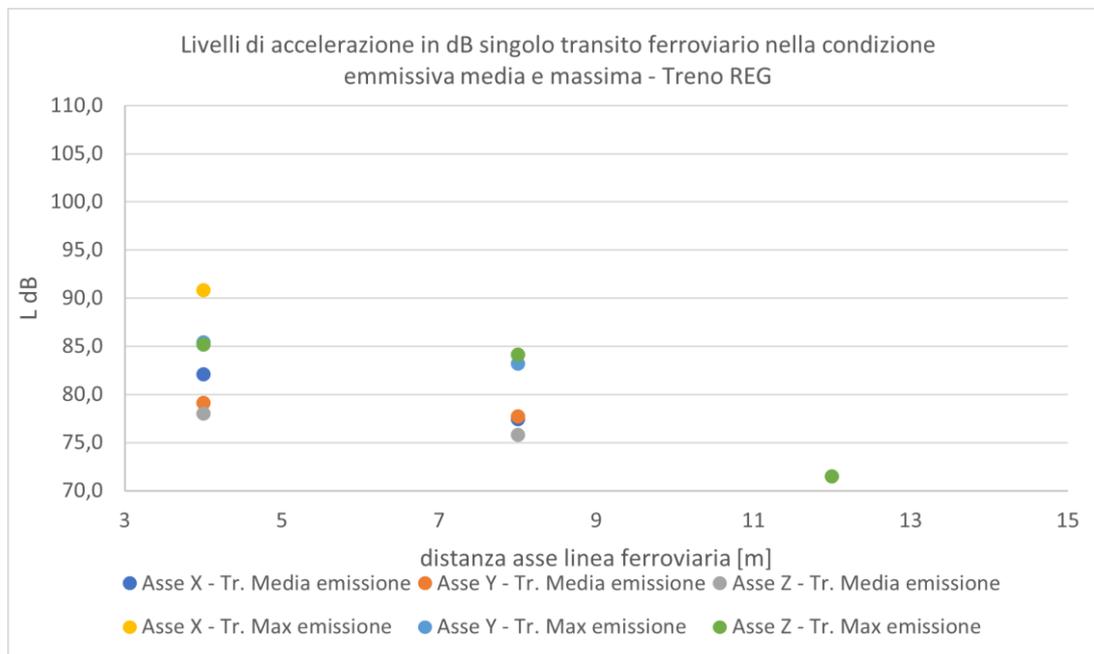


Figura 4-4 Livelli di accelerazione $L_{w,eq}$ in dB lungo gli assi X, Y e Z riferiti ad un singolo transito di un convoglio della categoria Regionale (REG) nella condizione di massima e media emissione rilevati in corrispondenza dei punti T1, T2 e T3

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 22 di 49

5 LO STUDIO DELLE VIBRAZIONI

5.1 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

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p align="center">RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2</p> <p align="center">PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE</p>					
<p>STUDIO VIBRAZIONALE</p> <p>Relazione generale</p>	<p>COMMESSA</p> <p>RR0P</p>	<p>LOTTO</p> <p>02 R 22</p>	<p>CODIFICA</p> <p>RG</p>	<p>DOCUMENTO</p> <p>IM0004.002</p>	<p>REV.</p> <p>A</p>	<p>FOGLIO</p> <p>23 di 49</p>

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*.

5.2 Caratterizzazione della sorgente di vibrazioni

5.2.1 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),

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE												
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">COMMESSA</td> <td style="text-align: center;">LOTTO</td> <td style="text-align: center;">CODIFICA</td> <td style="text-align: center;">DOCUMENTO</td> <td style="text-align: center;">REV.</td> <td style="text-align: center;">FOGLIO</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">RR0P</td> <td style="text-align: center;">02 R 22</td> <td style="text-align: center;">RG</td> <td style="text-align: center;">IM0004.002</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">24 di 49</td> </tr> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RR0P	02 R 22	RG	IM0004.002	A	24 di 49
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RR0P	02 R 22	RG	IM0004.002	A	24 di 49								

- 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 %

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 25 di 49

5.2.2 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 variabile tra i 3 e i 6 dB nei livelli di vibrazione e ciò in maniera indipendente dalla frequenza.

5.2.3 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

¹ 0 dB \cong 1 μ m/s²

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A

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.

5.2.4 La propagazione delle vibrazioni nel terreno

5.2.4.1 Le modalità di propagazione delle vibrazioni nel terreno

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

L'emissione vibrazionale complessiva di origine ferroviaria viene trasferita nel terreno e propagata nell'intorno della sede ferroviaria attraverso onde vibrazionali. Queste sono composte nelle seguenti componenti:

- onde di taglio L_t (s-wave), S;
- onde di compressione L_c (p-wave), P;
- onde di superficie L_s (r-wave), R per le orizzontali, L per le verticali (onde di Rayleigh e di Love).

Le onde di taglio (S) e di compressione (P) sono anche chiamate onde di volume (body-wave). Ognuna di queste onde è caratterizzata da una propria legge di propagazione in funzione della loro intensità e composizione geologica del terreno. La velocità di propagazione è infatti dipendente dal modulo di Young, dal rapporto di Poisson e dalla densità del terreno.

Onde di compressione (p-wave)	Onde di taglio (s-wave)	Onde superficiali (r-wave)
Alte velocità di propagazione	Medie velocità di propagazione	Basse velocità di propagazione

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A

Oscillazioni longitudinali	Oscillazioni trasversali	Oscillazioni verticali ma che rapidamente si trasformano in componenti orizzontali con la distanza
La velocità di propagazione incrementa al di sotto del livello del mare (terreni umidi)	La velocità di propagazione si attenua in terreni umidi	La velocità di propagazione è indipendente dalla percentuale di acqua nel terreno
Onde "dispersive" (la velocità di propagazione dipende dalla frequenza)	Onde "dispersive" (la velocità di propagazione dipende dalla frequenza)	Onde "non dispersive" La velocità di propagazione è dipendente dalla frequenza in terreni omogenei
La propagazione proporzionale all'energia è bassa	La propagazione proporzionale all'energia è intermedia	La propagazione proporzionale all'energia è alta

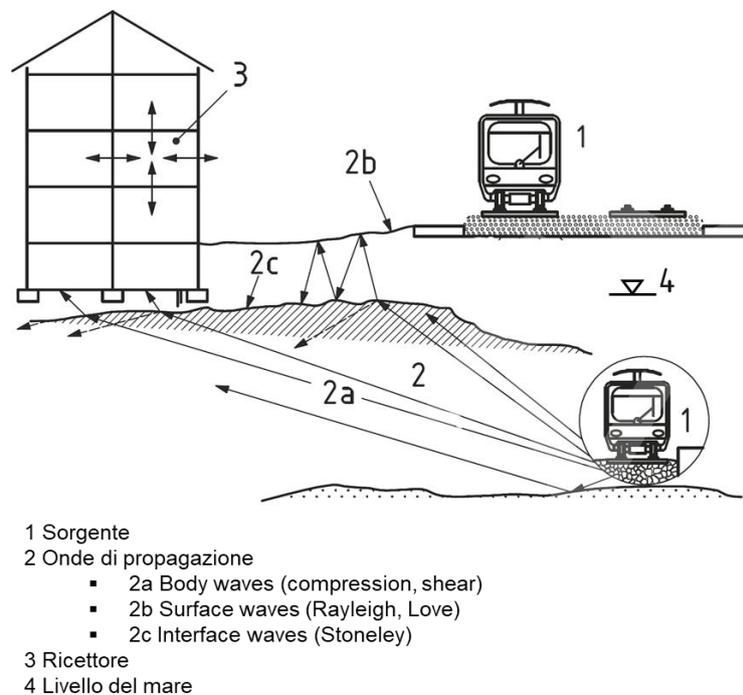


Figura 5 Schematizzazione della propagazione delle vibrazioni ferroviarie (fonte: ISO 14837-1:2005)

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 28 di 49

In linea generale nel caso di linee ferroviarie allo scoperto la componente prevalente delle vibrazioni è data dalle onde superficiali (R e L) che costituiscono circa il 67% dell'ampiezza complessiva. A queste si associano anche le componenti date dalle onde di taglio (S), circa il 26%, e di compressione (P), circa il 7%.

Nel caso invece di linee ferroviarie in sotterraneo la propagazione delle onde dipende dall'altimetria della galleria. Per le gallerie profonde generalmente prevalgono le componenti delle onde di volume (compressione P, taglio S), seppur con l'aumentare della distanza possono prevalere quelle di superficie (R e L). Per le gallerie invece non profonde le onde superficiali (R e L) assumono maggior rilievo rispetto a quelle di volume (S e P).

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 più 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 dalla granulometria, dalla

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A

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:

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

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 30 di 49

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:

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

dove:

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

Nel caso specifico della sorgente ferroviaria, essendo questa una sorgente irraggiante di tipo lineare, le onde di superficie sono attenuate solamente per effetto dello smorzamento. Le onde di corpo si attenuano comunque sia per effetto della distanza (effetto geometrico) che per effetto dello smorzamento intrinseco del materiale suolo. L'effetto geometrico è indipendente dalla frequenza, mentre quello dissipativo cresce linearmente con la frequenza.

Nel complesso quindi l'attenuazione delle onde vibrazionali ferroviarie nel terreno può essere quindi parametrizzata secondo le seguenti formule analitiche:

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

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A

con L_t , L_c e L_s rispettivamente i livelli trasmessi nel terreno delle componenti delle onde di taglio, compressione e di superficie.

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

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

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

dove:

- L e L_0 sono i livelli di vibrazioni in decibel attenuato e alla sorgente
- R e R_0 sono le rispettive distanze riferite all'asse della linea
- β_c , β_t , e β_s sono i fattori di importanza relativa tra i differenti meccanismi di propagazione delle onde del terreno
- K_c , K_t , e K_s sono i coefficienti di attenuazione geometrica per i differenti meccanismi di propagazione delle onde nel terreno
- α_c , α_t , e α_s sono i fattori di perdita per dissipazione per i differenti meccanismi di propagazione delle onde nel terreno [dB]
- V_c , V_t , e V_s sono le velocità di propagazione delle onde nel terreno [m/s]
- f è la frequenza [Hz]

5.2.4.2 La legge di attenuazione delle vibrazioni nel terreno nel caso specifico in studio

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.

La funzione di propagazione delle vibrazioni nel terreno è stata determinata per una sezione di corpo ferroviario a raso. 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

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A

distanza. Nei grafici seguenti sono riportati i valori sperimentali sui quali è applicata la regressione logaritmica al fine di definire la funzione di trasferimento.

L'analisi è stata condotta considerando la condizione di media emissione.

Dai dati misurati in corrispondenza delle terne T1, T2 e T3 nella postazione VIB01 sono state determinate le funzioni di attenuazione delle vibrazioni relative al transito di un singolo convoglio ferroviario.

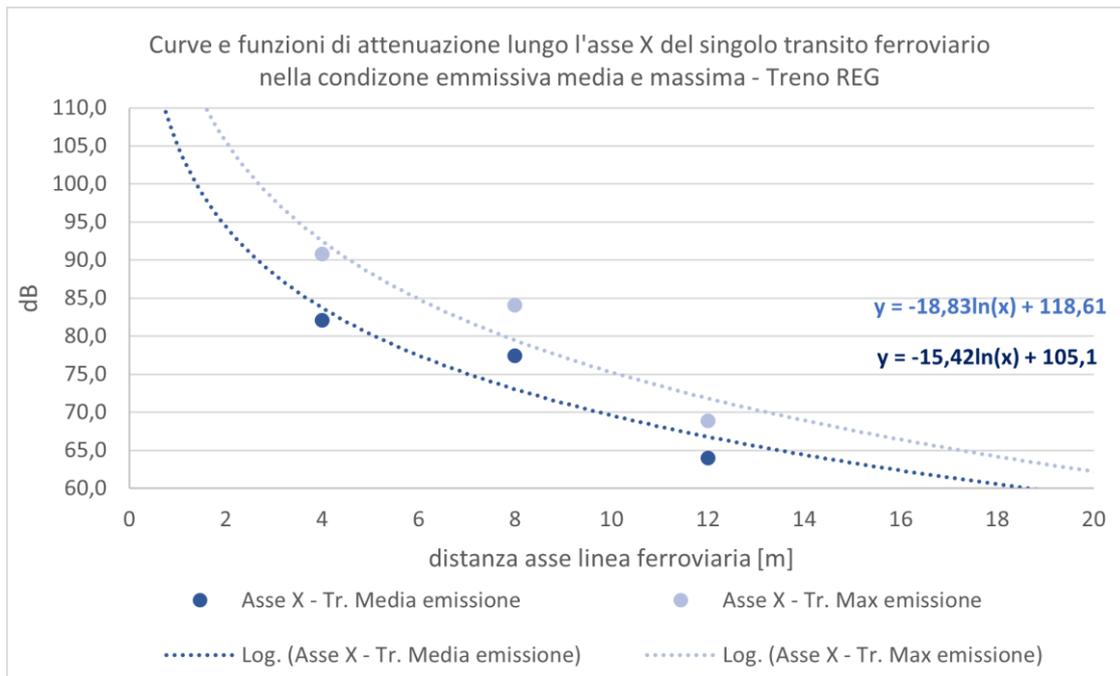


Figura 5-6 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno lungo l'asse X indotte dal singolo transito di un convoglio Regionale (REG)

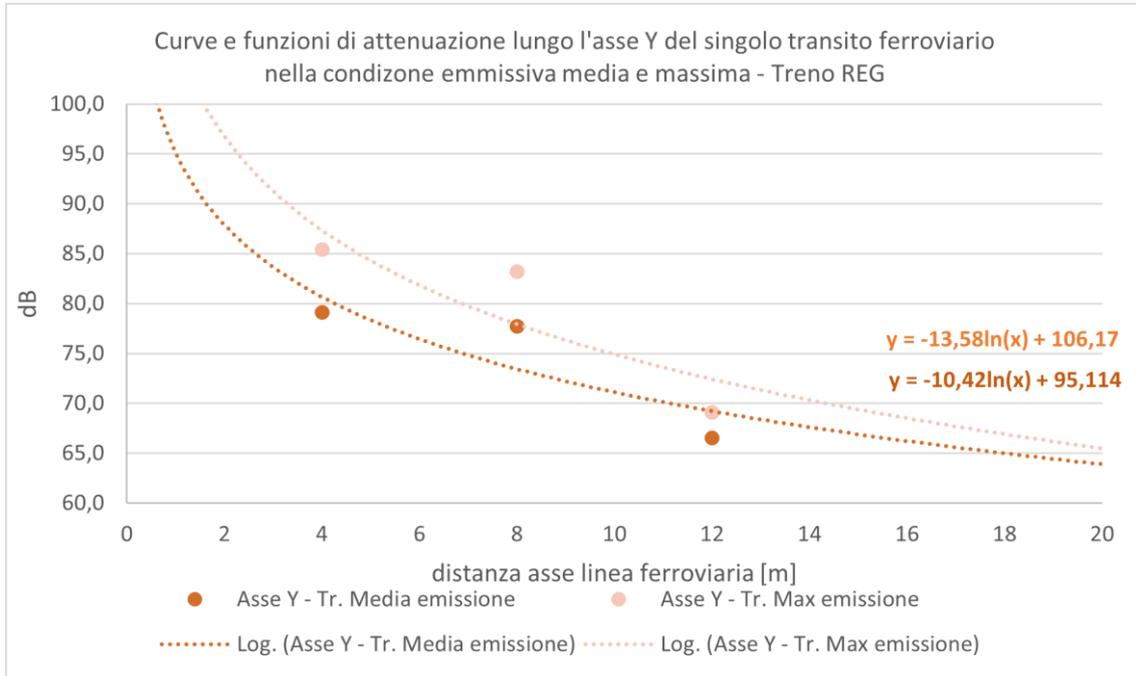


Figura 5-7 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno lungo l'asse Y indotte dal singolo transito di un convoglio Regionale (REG)

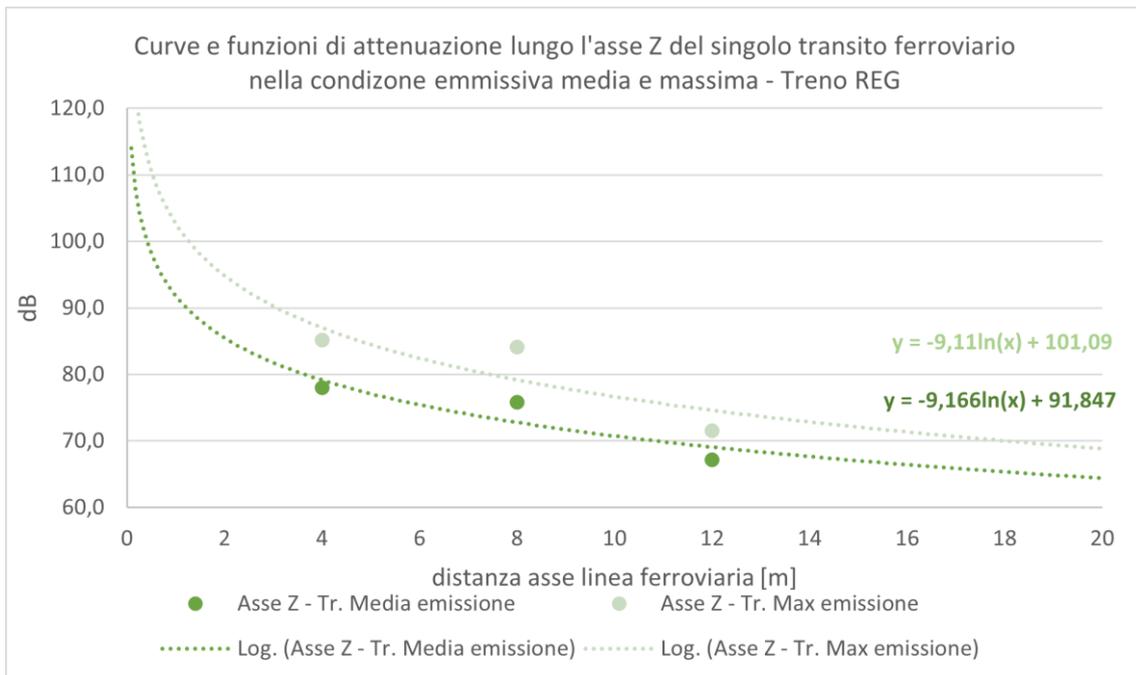


Figura 5-8 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno lungo l'asse Z indotte dal singolo transito di un convoglio Regionale (REG)

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 34 di 49

5.3 La propagazione delle vibrazioni nelle strutture edilizie

5.3.1 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.

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A

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.

5.3.2 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.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p align="center">RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2</p> <p align="center">PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE</p>					
<p>STUDIO VIBRAZIONALE</p> <p>Relazione generale</p>	<p>COMMESSA</p> <p>RR0P</p>	<p>LOTTO</p> <p>02 R 22</p>	<p>CODIFICA</p> <p>RG</p>	<p>DOCUMENTO</p> <p>IM0004.002</p>	<p>REV.</p> <p>A</p>	<p>FOGLIO</p> <p>36 di 49</p>

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.

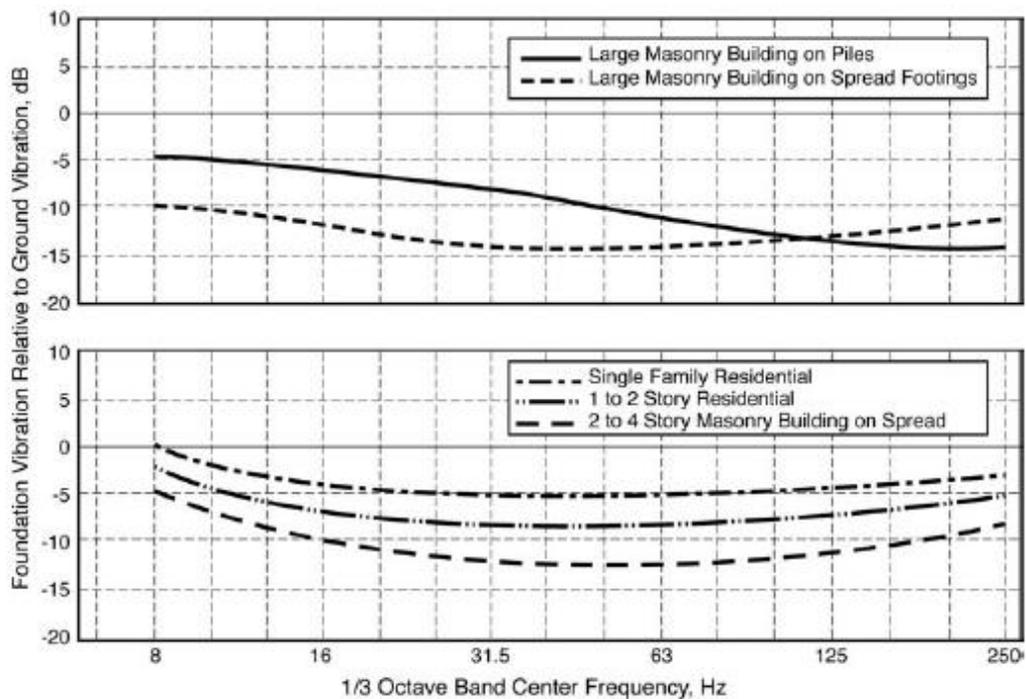


Tabella 5-1 Risposta delle fondazioni per diverse tipologie di edifici (Fonte: FTA, USA)

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE												
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">COMMESSA</th> <th style="text-align: left;">LOTTO</th> <th style="text-align: left;">CODIFICA</th> <th style="text-align: left;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: left;">REV.</th> <th style="text-align: left;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RR0P</td> <td>02 R 22</td> <td>RG</td> <td>IM0004.002</td> <td>A</td> <td>37 di 49</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RR0P	02 R 22	RG	IM0004.002	A	37 di 49
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RR0P	02 R 22	RG	IM0004.002	A	37 di 49								

5.3.3 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.

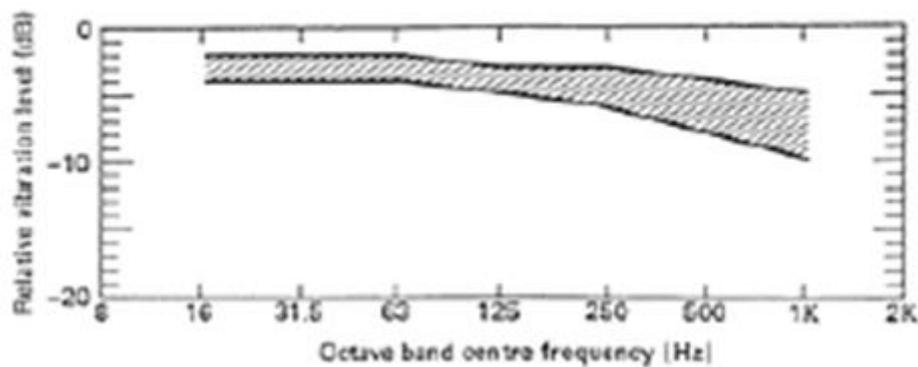


Tabella 5-2 Attenuazione delle vibrazioni nel passaggio da un piano al successivo

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.

5.3.4 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

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A

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 poiché 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.

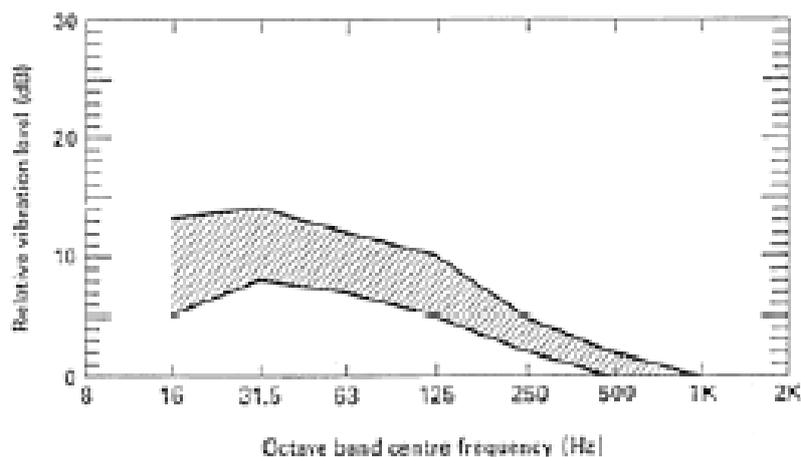


Tabella 5-3 Amplificazione prodotta dai solai

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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A

5.3.5 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.

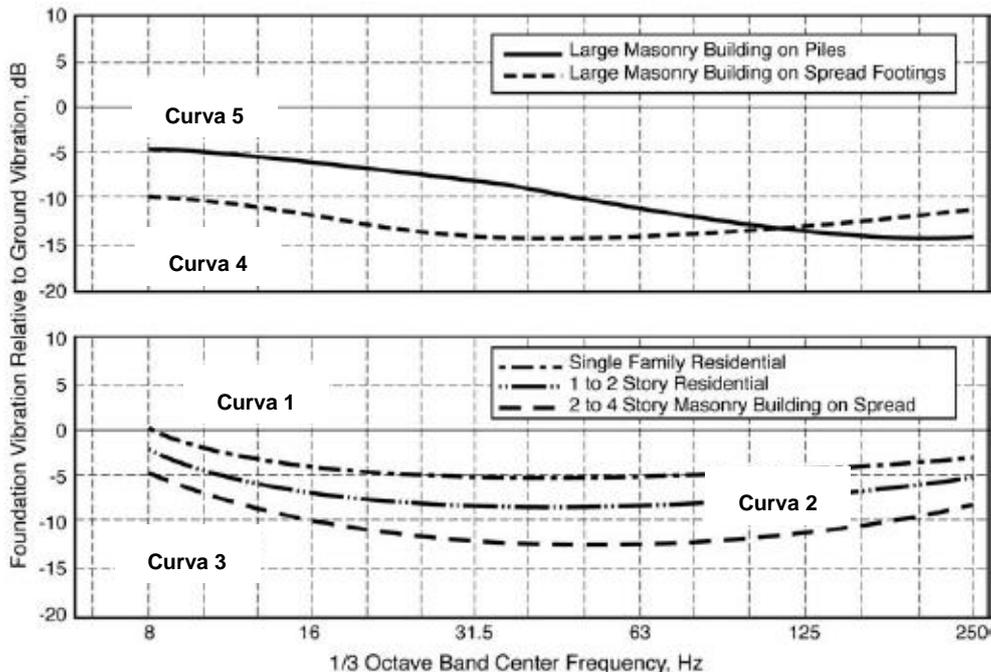


Tabella 5-4 Fattori correttivi dovuti alla tipologia di fondazione

 <p>ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p align="center">RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2</p> <p align="center">PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE</p>					
<p>STUDIO VIBRAZIONALE</p> <p>Relazione generale</p>	<p>COMMESSA</p> <p>RR0P</p>	<p>LOTTO</p> <p>02 R 22</p>	<p>CODIFICA</p> <p>RG</p>	<p>DOCUMENTO</p> <p>IM0004.002</p>	<p>REV.</p> <p>A</p>	<p>FOGLIO</p> <p>40 di 49</p>

Le tipologie edilizie prevalenti in adiacenza al tracciato sono rappresentate da 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.

5.3.6 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

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 41 di 49

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

5.4 Il modello previsionale per l'analisi delle vibrazioni

Sulla scorta di quanto detto per l'analisi delle vibrazioni il modello previsionale assunto nel presente studio si basa sui dati sperimentali misurati lungo l'attuale linea Decimomannu-Villamassargia secondo il parco ferroviario circolante e le condizioni geologiche del territorio interessato. Dai dati sperimentali sono state desunte le leggi di propagazione delle onde vibrazionali nel terreno secondo diverse tipologie di corpo ferroviario.

Per tener conto degli effetti di propagazione all'interno degli edifici, che, come visto, dipendono dalla tipologia di strutture, fondazioni, etc., sulla scorta di studi sviluppati in contesti simili, si è tenuto conto di un fattore cautelativo di +5dB associato ad eventuali fenomeni di amplificazione esclusivamente lungo gli assi X, Y e Z.

6 LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO

6.1 Analisi previsionale 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 e limitato ad una fascia di valenza del fenomeno di ampiezza pari a 50 m per lato dall'asse del binario più esterno.

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

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 42 di 49

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 (+5 dB).

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. Per le tratte in galleria naturale/artificiale in sotterraneo è verificata anche la condizione di disturbo associata al singolo transito ferroviario nella condizione più critica (generalmente il transito di un treno merci) in accordo al Manuale stesso.

L'analisi previsionale ha tenuto conto del modello previsionale sperimentale descritto nel capitolo precedente e quindi sulla scorta di dati misurati in situ secondo il contesto antropico/naturale specifico dell'ambito di studio e il parco circolante caratterizzante la linea in esame.

6.2 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 ferroviarie oggetto di intervento. Di seguito (Tabella 6-1) si riporta il modello di esercizio previsto e le velocità di progetto della linea ferroviaria oggetto di studio.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE												
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">COMMESSA</td> <td style="text-align: center;">LOTTO</td> <td style="text-align: center;">CODIFICA</td> <td style="text-align: center;">DOCUMENTO</td> <td style="text-align: center;">REV.</td> <td style="text-align: center;">FOGLIO</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">RR0P</td> <td style="text-align: center;">02 R 22</td> <td style="text-align: center;">RG</td> <td style="text-align: center;">IM0004.002</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">43 di 49</td> </tr> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RR0P	02 R 22	RG	IM0004.002	A	43 di 49
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RR0P	02 R 22	RG	IM0004.002	A	43 di 49								

Linea Decimomannu-Villamassargia				
Tratta Decimomannu-Uta Villaspeciosa				
Categoria	Diurni	Notturmi	Totale	V [km/h]
REG	128	0	128	160

Tabella 6-1 Modello di esercizio previsto per la tratta ferroviaria oggetto di studio

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 44 di 49

6.3 Livelli vibrazionali indotti

6.3.1 *Determinazione dei livelli vibrazionali indotti*

Applicando il modello previsionale sperimentale opportunamente adattato in funzione della velocità di transito dei convogli ferroviari e della tipologia di corpo ferroviario sono stati determinati i livelli di accelerazione indotti dalla sorgente ferroviaria secondo l'intero modello di esercizio sul territorio contermina l'infrastruttura. L'analisi tiene conto della sovrapposizione degli effetti delle due linee di progetto in affiancamento.

Limitatamente alle tratte in galleria artificiale/naturale l'analisi è estesa anche alla condizione di emissione del singolo transito nel periodo temporale limitato alla durata dell'evento stesso.

In ciascun caso ai livelli vibrazionali individuati si considera un fattore cautelativo di +5dB per tener conto dei possibili effetti di amplificazione delle vibrazioni nelle strutture.

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

6.3.2 Intero modello di esercizio

Postazione	Lw,eq [dB] Diurno		
	X	Y	Z
T1 (4 m da binario)	78,3	75,3	74,2
T2 (8 m da binario)	73,6	73,9	72,0
T3 (12 m da binario)	60,2	62,7	63,4

Tabella 6-2 Livelli di accelerazione all'interno degli edifici. Valori diurni e notturni lungo gli assi X, Y e Z complessivamente attesi secondo il programma di esercizio previsto. Valori medi

6.4 Determinazione della fascia di potenziale disturbo

6.4.1 Intero modello di esercizio

Considerando i livelli di accelerazione stimati si determinano dalle curve di attenuazione le distanze dall'asse della linea o del binario esterno si raggiungono i valori soglia rappresentativi dell'entità del disturbo nel periodo diurno (77 dB) e notturno (74 dB).

L'ampiezza della fascia di potenziale disturbo è determinata sulla scorta della condizione più critica (generalmente il periodo notturno in ragione del valore soglia più restrittivo).

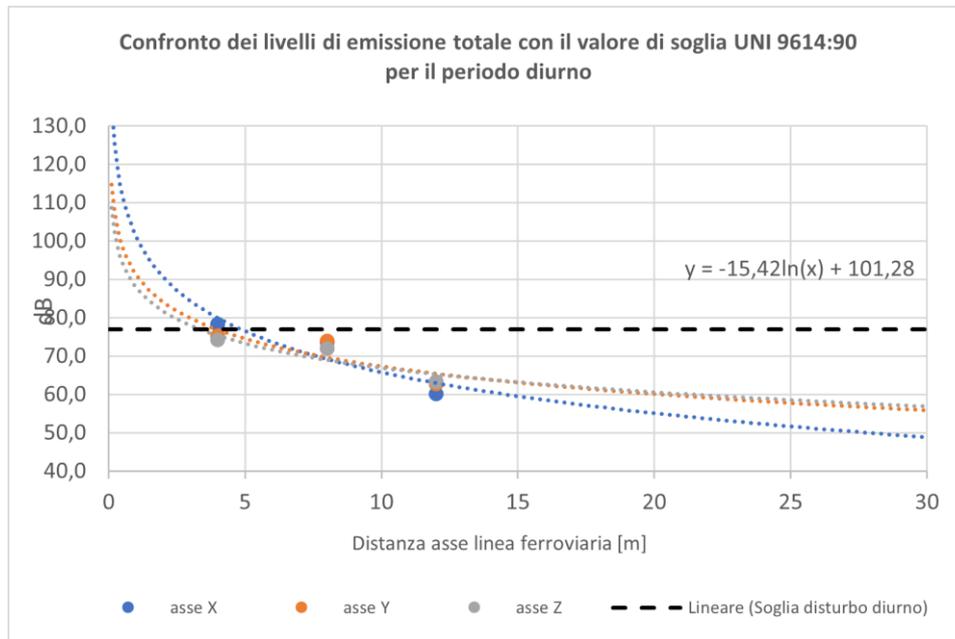


Figura 6-1 Confronto dei livelli di emissione complessiva con il valore soglia diurno UNI9614:1990 secondo il modello di esercizio previsto

Dai grafici si evince come:

- Il livello soglia diurno di 77 dB per le abitazioni nel periodo diurno viene raggiunto internamente agli edifici ad una distanza di circa 4,8 metri dall'asse del binario.

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A	FOGLIO 47 di 49

6.4.2 Individuazione della fascia di disturbo da vibrazioni

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

In riferimento a quanto riportato nel precedente paragrafo, si sintetizzano le distanze potenzialmente critiche individuate come quelle maggiori calcolate nel periodo diurno e notturno:

- 4,8 metri dall'asse del binario (intero modello di esercizio);

La fascia di disturbo da vibrazioni ferroviarie è definita dalla condizione più critica sopra individuata in funzione della tipologia di corpo ferroviario, di condizione e di tipologia di traffico ferroviario.

6.5 Determinazione della fascia di potenziale disturbo

Dalla planimetria di censimento dei ricettori e le schede di censimento sviluppate nell'ambito dello studio acustico (elaborati cod. RR0P02R22P6IM0004001A e RR0P02R22SHIM0004001A) si determinano gli eventuali edifici residenziali oggetto di disturbo da vibrazioni ferroviarie.

Considerando l'ampiezza della fascia di disturbo da vibrazioni ferroviarie stimata nel paragrafo precedente, dalla sovrapposizione con la planimetria dei ricettori si evince l'assenza di edifici oggetto di disturbo.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p align="center">RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2</p> <p align="center">PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE</p>					
<p>STUDIO VIBRAZIONALE</p> <p>Relazione generale</p>	<p>COMMESSA</p> <p>RR0P</p>	<p>LOTTO</p> <p>02 R 22</p>	<p>CODIFICA</p> <p>RG</p>	<p>DOCUMENTO</p> <p>IM0004.002</p>	<p>REV.</p> <p>A</p>	<p>FOGLIO</p> <p>48 di 49</p>

7 CONCLUSIONI

Le analisi vibrazionali sviluppate sulla base di dati sperimentali in situ hanno permesso di individuare le problematiche di propagazione delle vibrazioni indotte dal traffico ferroviario lungo le linee ferroviarie oggetto di intervento nell'ambito del presente progetto.

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*" in accordo al Manuale di Progettazione RFI. Nello specifico le valutazioni hanno tenuto conto dello scenario complessivo associato all'intero modello di esercizio nell'intero periodo diurno e notturno individuato dalla normativa di riferimento.

Il modello previsionale assunto per la stima dei livelli di accelerazione in corrispondenza della ferrovia, si basa sull'individuazione di una legge di propagazione tarata in funzione di indagini sperimentali di sorgenti ferroviarie e di fattori cautelativi che tengono conto dei molteplici fattori concorrenti alla propagazione delle onde vibrazionali nel terreno e nelle strutture. Dall'applicazione di tale modello al caso specifico in studio e ai diversi scenari di riferimento, sono state individuate le funzioni di attenuazione delle vibrazioni utilizzate per determinare le distanze critiche, ovvero l'ampiezza della fascia di potenziale disturbo da vibrazioni a partire dall'asse del binario.

In riferimento alla valutazione delle vibrazioni all'interno degli edifici, il modello previsionale tiene conto di un fattore cautelativo di +5dB e rappresentativo dei soli fenomeni di amplificazione per effetto della propagazione delle onde all'interno delle strutture lungo ciascun asse di riferimento. Nell'ottica di adottare un approccio particolarmente cautelativo nella valutazione del disturbo sulle abitazioni contermini l'infrastruttura in esame, sono state ipotizzate trascurabili tutte le componenti di attenuazione che intervengono quando le onde vibrazionali dal terreno si trasmettono all'edificio (accoppiamento terreno-fondazioni, trasmissione interpiano, etc.).

L'approccio cautelativo è stato inoltre considerato nell'adozione dei valori di riferimento indicati dalla norma UNI9614 per la valutazione del disturbo. Sono stati infatti considerati i valori soglia indicati dalla norma più restrittivi (pari a 77 dB nel periodo diurno e 74 dB in quello notturno) seppur la norma stessa indica nell'appendice 4 specificatamente alla sorgente ferroviaria un valore di 89 dB per l'asse Z e 86,7 dB per gli assi X e Y a prescindere dal periodo temporale in cui si manifesta l'evento.

Le analisi vibrazionali hanno tenuto conto come detto della condizione complessiva di esposizione al disturbo indotto dall'intero modello di esercizio rapportato al periodo temporale diurno e notturno.

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione generale	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004.002	REV. A	FOGLIO 49 di 49

Dalla combinazione dei diversi scenari di studio sono state determinate le ampiezze delle fasce di disturbo, ovvero la distanza dall'asse del binario più esterno alla quale viene raggiunto il valore soglia dei 77 dB nel periodo diurno e 74 dB nel periodo notturno. Dall'unione delle suddette distanze, considerando la condizione più critica secondo la tipologia di esercizio si è determinata l'ampiezza della fascia di disturbo da vibrazioni, da cui non è risultata la presenza di edifici oggetti di disturbo. Le analisi vibrazionali saranno comunque oggetto di ulteriori approfondimenti ed aggiornamenti con le successive fasi di progettazione.