

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP J84C19000370009

U.O. ARCHITETTURA AMBIENTE E TERRITORIO
S.O. AMBIENTE

PROGETTO DEFINITIVO

TRATTA A.V./A.C. MILANO-VERONA
NODO DI BRESCIA
POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA

STUDIO VIBRAZIONALE
Relazione Generale

SCALA:

-

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

I N 1 M 1 1 D 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 | F. Giancola | Nov. 2021 | | Nov. 2021 | | Nov. 2021 | C. Ercolani Nov. 2021 |
| | | | | | | | | PER EMISSIONE ITALFERR S.p.A. Dott.ssa Carolina Ercolani S.O. Ambiente |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

n. Elab.:

INDICE

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | STUDIO VIBRAZIONALE | 2 |
| 2 | RIFERIMENTI NORMATIVI | 3 |
| 2.1 | IL QUADRO DELLE NORME DI RIFERIMENTO..... | 3 |
| 2.2 | ISO2631 "VALUTAZIONE SULL'ESPOSIZIONE DEL CORPO UMANO ALLE VIBRAZIONI..... | 3 |
| 2.3 | UNI 9614:1990 "MISURA DELLE VIBRAZIONI NEGLI EDIFICI E CRITERI DI VALUTAZIONE DEL DISTURBO" | 4 |
| 2.4 | UNI 9916:2014 "CRITERI DI MISURA E VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DELLE VIBRAZIONI SUGLI EDIFICI" | 5 |
| 3 | AREA DI STUDIO | 8 |
| 3.1 | INQUADRAMENTO TERRITORIALE | 8 |
| 3.2 | INQUADRAMENTO GEOLOGICO | 8 |
| 4 | INDAGINI VIBRAZIONALI | 11 |
| 4.1 | RILIEVI DI VIBRAZIONI | 11 |
| 4.2 | ANALISI DEI RILIEVI..... | 13 |
| 5 | STUDIO DELL'IMPATTO DA VIBRAZIONI | 15 |
| 5.1 | LE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO..... | 15 |
| 5.2 | CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE DI VIBRAZIONI..... | 16 |
| 5.2.1 | <i>Interazione ruota-rotaia</i> | 16 |
| 5.2.2 | <i>Velocità dei treni</i> | 18 |
| 5.2.3 | <i>Corpo ferroviario</i> | 18 |
| 5.3 | LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO | 19 |
| 5.4 | LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NELLE STRUTTURE EDILIZIE | 26 |
| 5.4.1 | <i>Risposta degli edifici alle vibrazioni</i> | 26 |
| 5.4.2 | <i>Accoppiamento terreno – fondazioni edificio</i> | 29 |
| 5.4.3 | <i>Trasmissione attraverso l'edificio</i> | 30 |
| 5.4.4 | <i>Risonanze strutturali dei solai</i> | 30 |
| 5.4.5 | <i>Individuazione delle vibrazioni trasmesse a ciascun edificio e stima della risposta</i> | 32 |
| 5.4.6 | <i>Rumore trasmesso per via solida dalle strutture</i> | 33 |
| 6 | LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO | 35 |
| 6.1 | PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO | 35 |
| 6.2 | TRAFFICO DI ESERCIZIO..... | 36 |
| 6.3 | LIVELLI VIBRAZIONALI INDOTTI | 38 |
| 6.4 | INDIVIDUAZIONE DELLE POTENZIALI AREE CRITICHE..... | 40 |

1 STUDIO VIBRAZIONALE

L'attivazione della tratta AV/AC Milano – Brescia del 2016 ha consentito di liberare la capacità sulla linea storica Milano-Venezia anche per traffici merci da/per Milano. L'incremento di traffico futuro sull'asse ferroviario Torino-Venezia richiede, tra gli altri, l'intervento di potenziamento dello Scalo di Brescia.

In tale scenario si inserisce il progetto in parola che deve compatibilizzare l'impianto attuale di Brescia (attivazione di fase 4) alle esigenze del futuro terminal intermodale di competenza di TerAlp, il quale sarà realizzato a sud dello scalo e comunicherà con il fascio merci dello scalo di Brescia. Il Terminal intermodale di TerAlp non è oggetto del presente progetto.

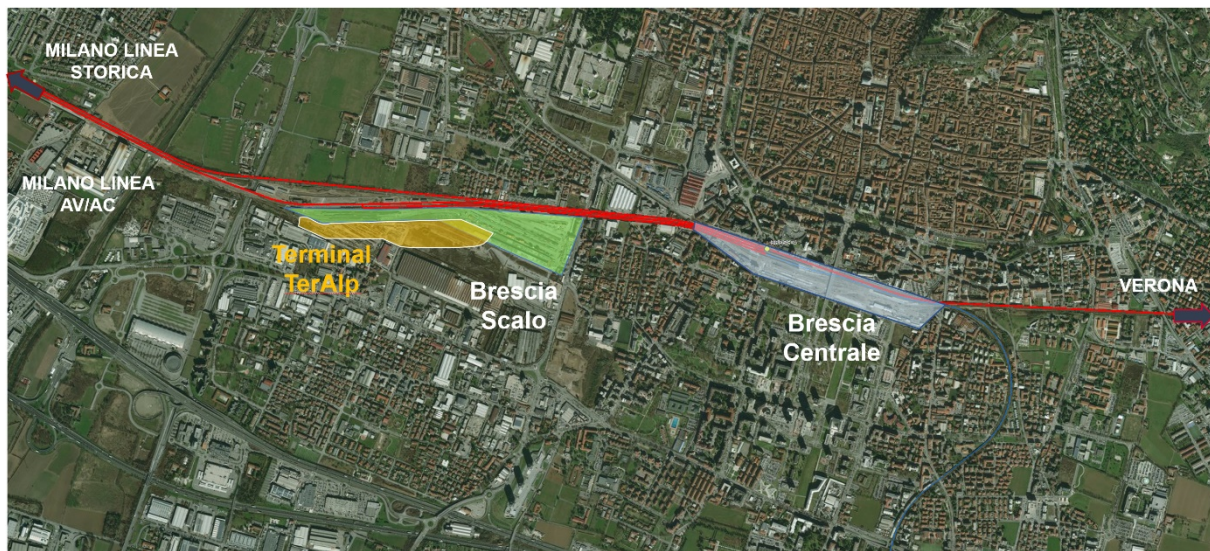


Figura 1 - Inquadramento area progetto - Brescia Scalo

Il presente capitolo contiene i risultati dello studio relativo all'impatto vibrazionale prodotto dai transiti ferroviari tenendo conto delle indicazioni delle norme tecniche, emanate in sede nazionale ed internazionale, sugli esiti delle specifiche misure vibrazionali condotte in sito e sui risultati di campagne di rilievi vibro-metrici eseguite in situazioni analoghe alla presente.

L'analisi dei livelli vibro-metrici viene effettuata distinguendo le tipologie di convogli che transiteranno sulla ferrovia, le condizioni geologiche che costituiscono il terreno tra ferrovia e ricettori e la tipologia di ricettore in termini di struttura e numero di piani.

Il valore complessivo di accelerazione 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 DTCSIAMMAIFS 001 D del 31.12.2020)".

| | | | | | | |
|---|--|------------------|-------------|------------------|-----------------------------|-----------|
|  | LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA - NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA PROGETTO DEFINITIVO | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE RELAZIONE GENERALE | COMMESSA IN1M | LOTTO 11 | FASE/ENTE D22 | DOCUMENTO RG IM 0004 002 | REV. A |

2 RIFERIMENTI NORMATIVI

2.1 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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Tabella 2-1 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.

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

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

Gli edifici sono classificati secondo tre tipologie:

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

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

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

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

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

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

| Valori di riferimento per la velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni a breve durata sulle costruzioni | | | | | | |
|---|---|--|---|---|------------------------|----------------------------|
| Classe | Tipo di Edificio | Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s | | | | |
| | | Fondazioni | | | Piano Alto | Solai Componente Verticale |
| | | Da 1Hz a 10Hz | Da 10Hz a 50Hz | Da 50Hz a 100Hz | Per tutte le frequenze | Per tutte le frequenze |
| 1 | Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzione strutturalmente simili | 20 | Varia linearmente da 20 ($f = 1\text{Hz}$) a 40 ($f=50\text{Hz}$) | Varia linearmente da 40 ($f = 1\text{Hz}$) a 50 ($f=50\text{Hz}$) | 40 | 20 |

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 | | | | |
|--------|---|--|--|--|----|-----|
| | | | | | | |
| 2 | Edifici residenziali e costruzioni simili | 5 | Varia linearmente da 5 ($f = 1\text{Hz}$) a 15 ($f=50\text{Hz}$) | Varia linearmente da 5 ($f = 1\text{Hz}$) a 20 ($f=50\text{Hz}$) | 15 | 20 |
| 3 | Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici) | 3 | Varia linearmente da 3 ($f = 1\text{Hz}$) a 8 ($f=50\text{Hz}$) | Varia linearmente da 8 ($f = 1\text{Hz}$) a 10 ($f=50\text{Hz}$) | 8 | 3/4 |

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

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

| Valori di riferimento per le componenti orizzontali della velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni durature sulle costruzioni | | |
|--|---|--|
| Classe | Tipo di Edificio | Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s Per tutte le frequenze |
| 1 | Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzione strutturalmente simili | 10 |
| 2 | Edifici residenziali e costruzioni simili | 5 |
| 3 | Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici) | 25 |

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'area di intervento ricade nel territorio del Comune di Brescia e, in parte, nel territorio del comune di Roncadelle. L'ambito di studio è caratterizzato da aree prevalentemente industriali / terziari con la presenza di alcuni ricettori residenziali.

3.2 Inquadramento geologico

I dati necessari alla definizione del quadro geologico dell'area di interesse sono stati estratti dalla carta geologica dell'Italia in scala 1:100.000. Di seguito si riporta un estratto della Carta Geolitologica, in cui si evince che l'area di progetto si trova in una zona caratterizzata da terreni prevalentemente alluvionali sabbiosi-ghiaiosi.

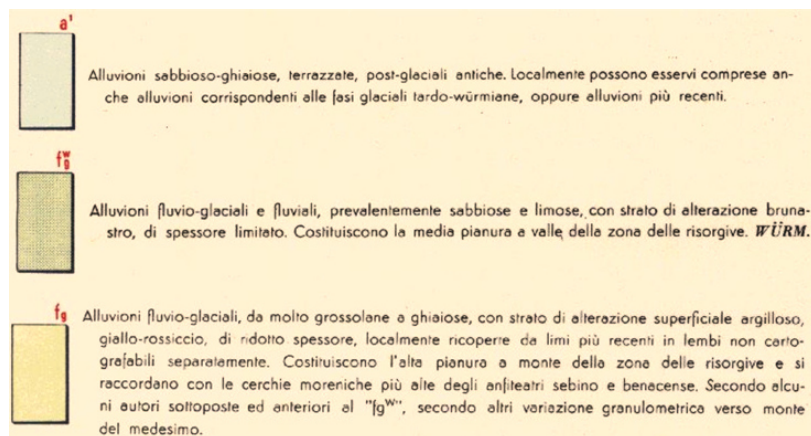


Figura 3-2 Stralcio non in scala della Carta Geolitologica d'Italia in scala 1:100.000.

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

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


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

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

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

La classificazione ai fini vibrazionali dei terreni interessati dagli interventi in progetto è considerata omogenea per tutto l'ambito di progetto nella condizione cautelativamente più restrittiva, cioè con minore fattore di attenuazione, ovvero quella rappresentata da:

| 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 |

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---|-------------------------|
|  | LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA - NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA PROGETTO DEFINITIVO | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE RELAZIONE GENERALE | COMMESSA IN1M | LOTTO 11 | FASE/ENTE D22 | DOCUMENTO RG IM 0004 002 | REV. A |

4 INDAGINI VIBRAZIONALI

4.1 Rilievi di vibrazioni

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.

Di seguito si riporta uno stralcio di ortofoto con il posizionamento della sezione di misura.



Figura 4-1 Localizzazione delle indagini vibrazionali lungo l'attuale linea di progetto

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. RFIDTCSIAMMAIFS001D del 31.12.2020. Lungo la via di propagazione sono stati posizionati tre vibrometri, ciascuno dotato di tre accelerometri (uno per ciascun asse di riferimento).

I punti di misura sono stati posizionati in un terreno ricompreso tra il margine della linea ferroviaria e via Orzinuovi, nel Comune di Brescia (BS) così come indicato nello stralcio planimetrico precedente.

Le tre terne accelerometriche sono state così posizionate in un terreno adiacente alla linea ferroviaria:

- Terna 1: distante 8 metri dall'asse binario esterno
- Terna 2: distante 14 metri dall'asse binario esterno
- Terna 3: distante 20 metri dall'asse binario esterno

Le indagini sono state eseguite il giorno 07/10/2021.

All'interno della finestra di misura sono transitati 40 convogli complessivi, di cui n° 25 treni Eurostar, n° 11 convogli merci, n° 3 treni regionali e n°1 locomotore isolato (LIS).

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).

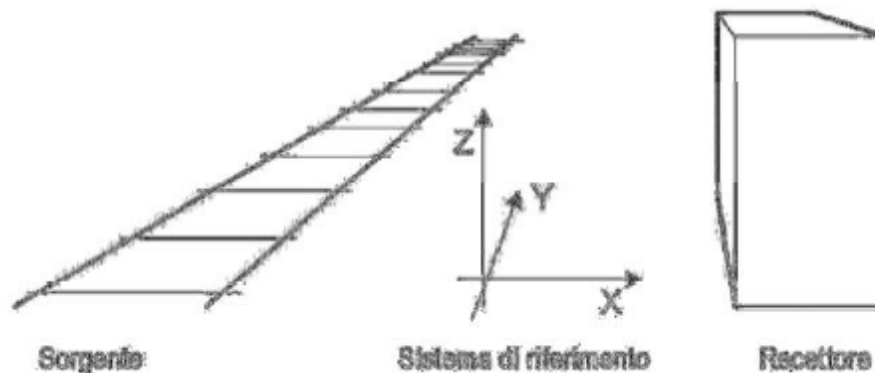


Figura 4-2 Orientamento delle componenti vibrazionali rispetto alle sorgenti



Figura 4-3 Foto di installazione

I rilievi vibrometrici permettono 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

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 è stato possibile campionare i livelli di accelerazione relativi a diversi treni eurostar regionali e merci lungo la linea AC/AV che costituiscono la totalità del modello di esercizio previsto dal presente progetto. Questi dati, insieme alle informazioni relative alla velocità dei convogli e alla durata degli eventi vibrazionali, hanno permesso di estrapolare le emissioni del treno regionale, eurostar e merci “medio” nelle condizioni in esame.

Nella tabella seguente si riportano i valori dei livelli di accelerazione $L_{w,eq}$ lungo gli assi X, Y e Z, riferiti sia alla condizione critica, ovvero al singolo transito che ha indotto i valori massimi di accelerazione, sia alla condizione media ricorrente sulla base dei valori osservati nell'intero periodo di misura.

| Cate goria | Postazione | Vel. Media [km/h] | Durata media [s] | L _{w,eq} max [dB] | | | L _{w,eq} media [dB] | | |
|---------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------------|------|------|------------------------------|------|------|
| | | | | X | Y | Z | X | Y | Z |
| Regionale | T1 (8 m da binario) | | | 70,9 | 73,6 | 66,8 | 70,9 | 73,6 | 66,8 |
| | T2 (12 m da binario) | | | 59,3 | 61,3 | 62,7 | 59,3 | 61,3 | 62,7 |
| | T3 (20 m da binario) | | | 61,9 | 63,2 | 64,4 | 61,9 | 63,2 | 64,4 |
| Eurostar | T1 (8 m da binario) | 64,2 | 11 | 76,2 | 79,0 | 70,1 | 72,3 | 74,2 | 66,0 |
| | T2 (12 m da binario) | | | 59,9 | 64,5 | 65,1 | 57,9 | 60,9 | 62,1 |
| | T3 (20 m da binario) | | | 62,1 | 63,5 | 64,6 | 59,0 | 60,8 | 61,2 |
| Merci | T1 (8 m da binario) | 31,5 | 48 | 77,0 | 78,5 | 66,5 | 74,5 | 75,9 | 64,0 |
| | T2 (12 m da binario) | | | 57,2 | 63,2 | 59,7 | 54,8 | 60,5 | 57,6 |
| | T3 (20 m da binario) | | | 55,3 | 58,5 | 58,1 | 53,2 | 56,5 | 56,2 |

Tabella 4-1 Livelli di accelerazione $L_{w,eq}$ in dB riferiti ad un singolo transito di un convoglio delle tipologie di convogli rilevate nella condizione di massima e media emissione rilevati in corrispondenza dei punti T1, T2 e T3.

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---|-------------------------|
|  | LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA - NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA PROGETTO DEFINITIVO | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE RELAZIONE GENERALE | COMMESSA IN1M | LOTTO 11 | FASE/ENTE D22 | DOCUMENTO RG IM 0004 002 | REV. A |

5 STUDIO DELL'IMPATTO DA 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

| | | | | | | |
|---|--|------------------|-------------|------------------|-----------------------------|-----------|
|  | LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA - NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA PROGETTO DEFINITIVO | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE RELAZIONE GENERALE | COMMESSA IN1M | LOTTO 11 | FASE/ENTE D22 | DOCUMENTO RG IM 0004 002 | REV. A |

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.

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),
- 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. È 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% |

| Tipo di carico | Carico | Contributo |
|----------------|--|------------|
| “ | Contributo dovuto ad asperità delle ruote | 50 – 300 % |
| “ | Contributo dovuto ad accelerazioni e frenature | 5 – 20 % |

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 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.

5.3 La propagazione delle vibrazioni nel terreno

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

Seppur esistono in letteratura numerosi modelli che permettono il calcolo della propagazione delle vibrazioni ferroviarie, modelli che vanno da equazioni di tipo empirico a modelli BEM/FEM, nel caso in oggetto si è ritenuto opportuno rifarsi a dati sperimentali specifici all'ambito di studio.

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

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

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

dove:

$d+d_0$: distanza dall'asse della linea ferroviaria

d_0 : distanza di riferimento

$n=0,5$ per galleria, $n=1$ per tracciato di superficie

¹ 0 dB \cong 1 $\mu\text{m/s}^2$

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


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

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

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

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

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

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|--------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------|
|  | LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA - NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA PROGETTO DEFINITIVO | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE RELAZIONE GENERALE | COMMESSA IN1M | LOTTO 11 | FASE/ENTE D22 | DOCUMENTO RG IM 0004 002 | REV. A |

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

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.

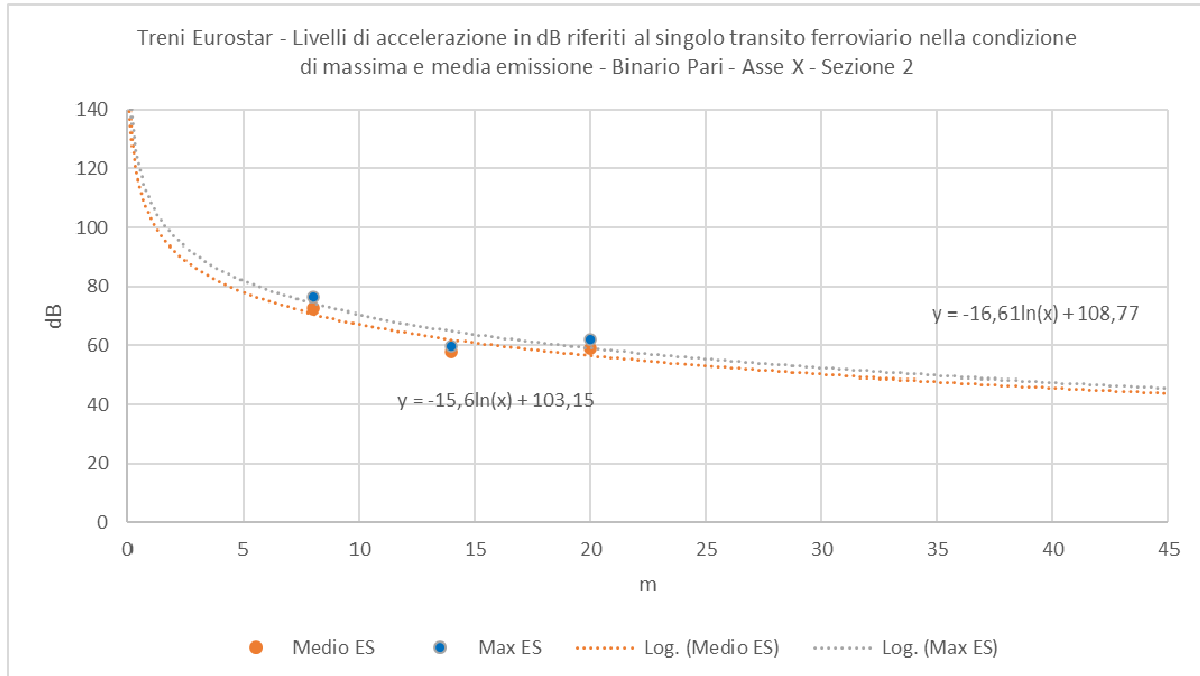


Figura 5-1 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno sulla base dei dati sperimentali lungo l'asse X per la tipologia di treno Eurostar nella condizione di massima e media emissione.

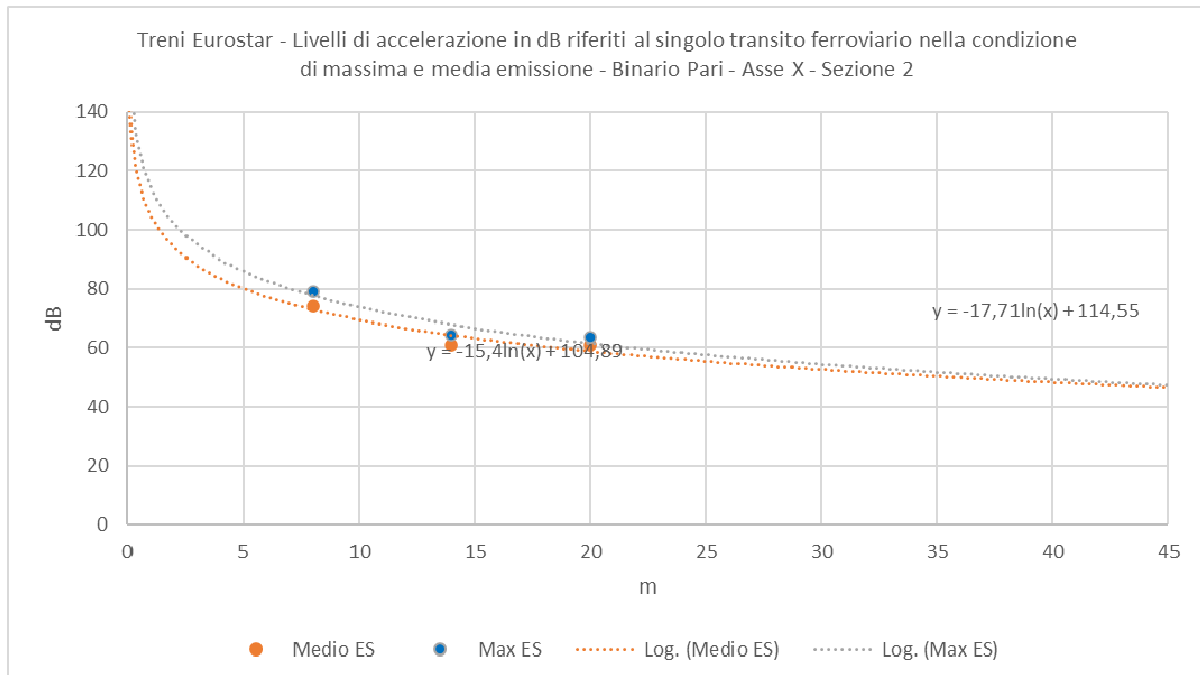


Figura 5-2 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno sulla base dei dati sperimentali lungo l'asse Y per la tipologia di treno Eurostar nella condizione di massima e media emissione.

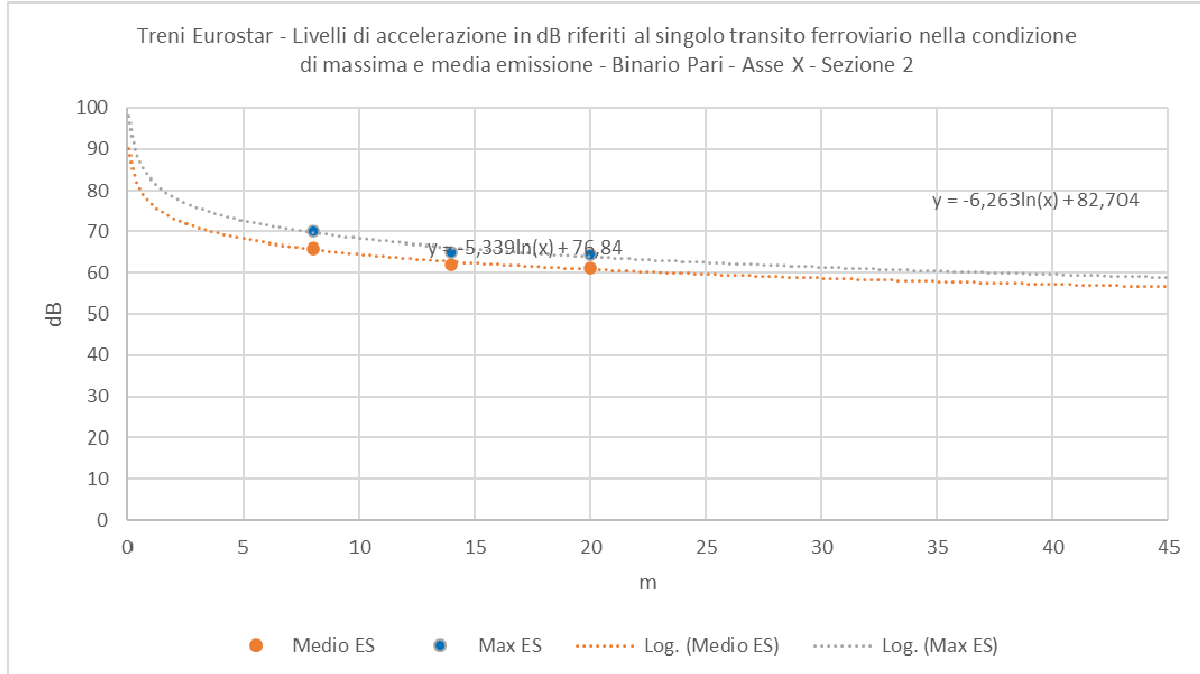


Figura 5-3 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno sulla base dei dati sperimentali lungo l'asse Z per la tipologia di treno Eurostar nella condizione di massima e media emissione.

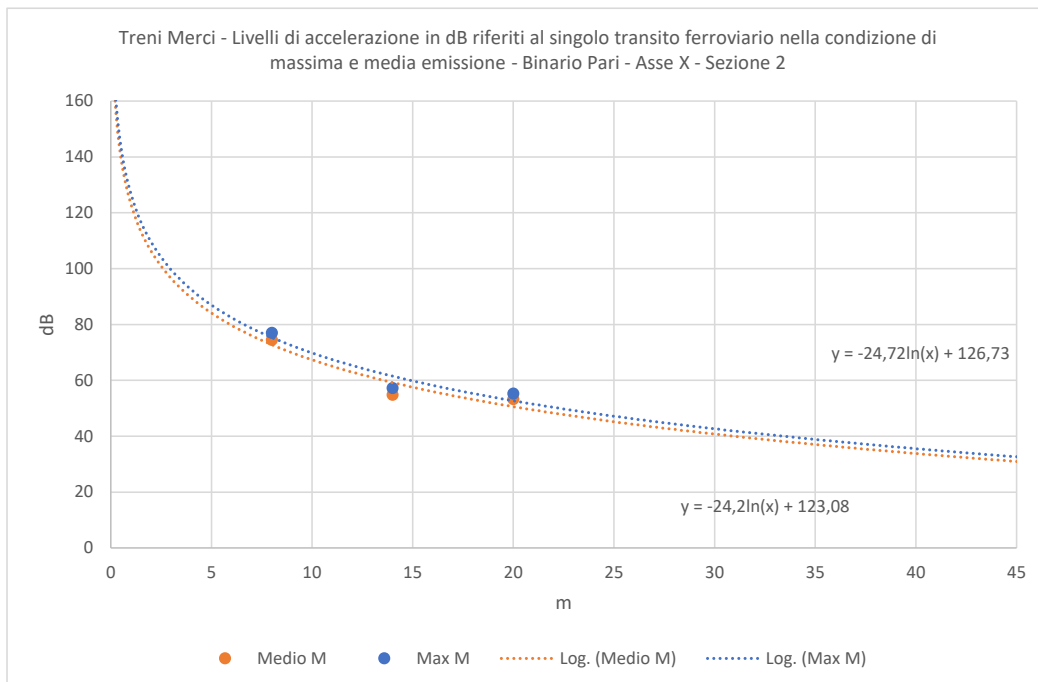


Figura 5-4 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno sulla base dei dati sperimentali lungo l'asse X per la tipologia di treno mercì nella condizione di massima e media emissione.

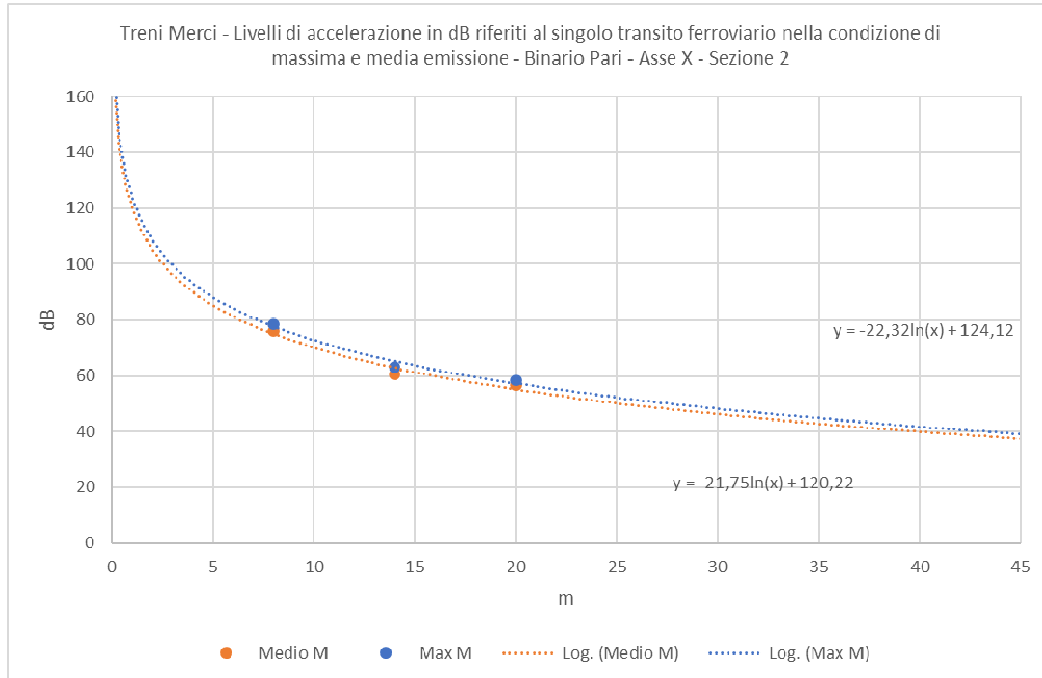


Figura 5-5 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno sulla base dei dati sperimentali lungo l'asse Y per la tipologia di treno mercè nella condizione di massima e media emissione.

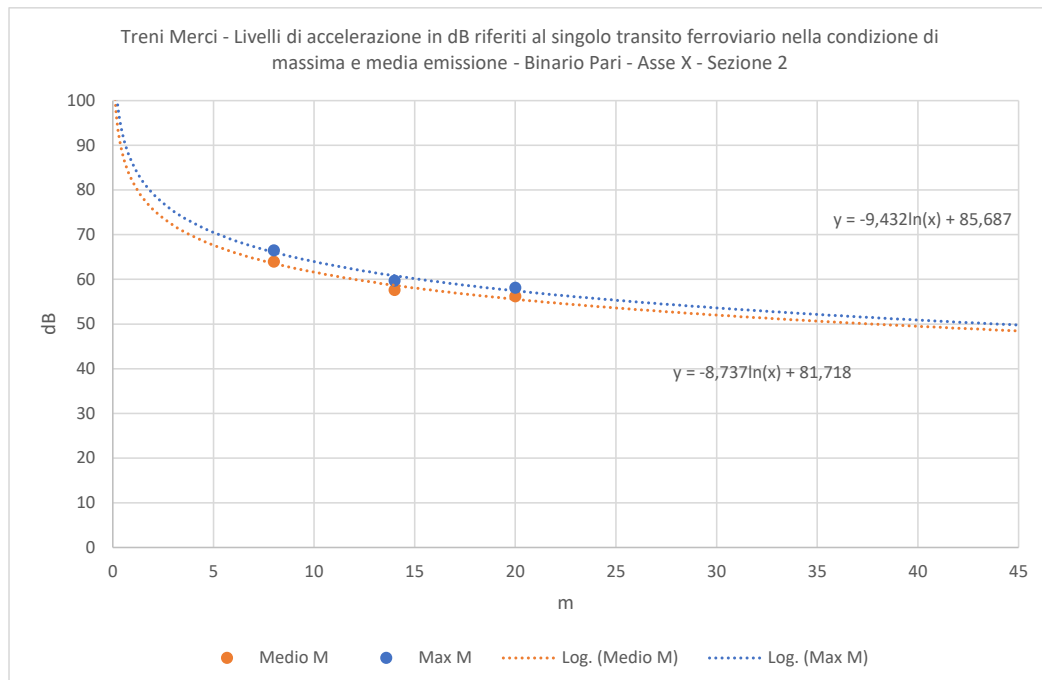


Figura 5-6 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno sulla base dei dati sperimentali lungo l'asse Z per la tipologia di treno mercè nella condizione di massima e media emissione.

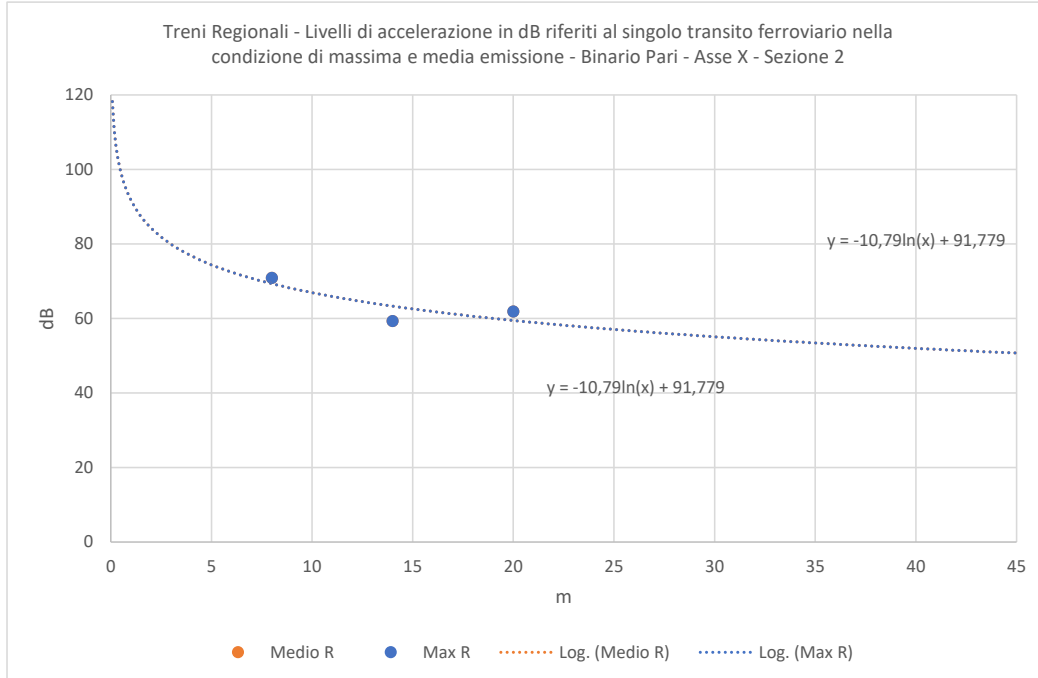


Figura 5-7 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno sulla base dei dati sperimentali lungo l'asse X per la tipologia di treno regionale nella condizione di massima e media emissione.

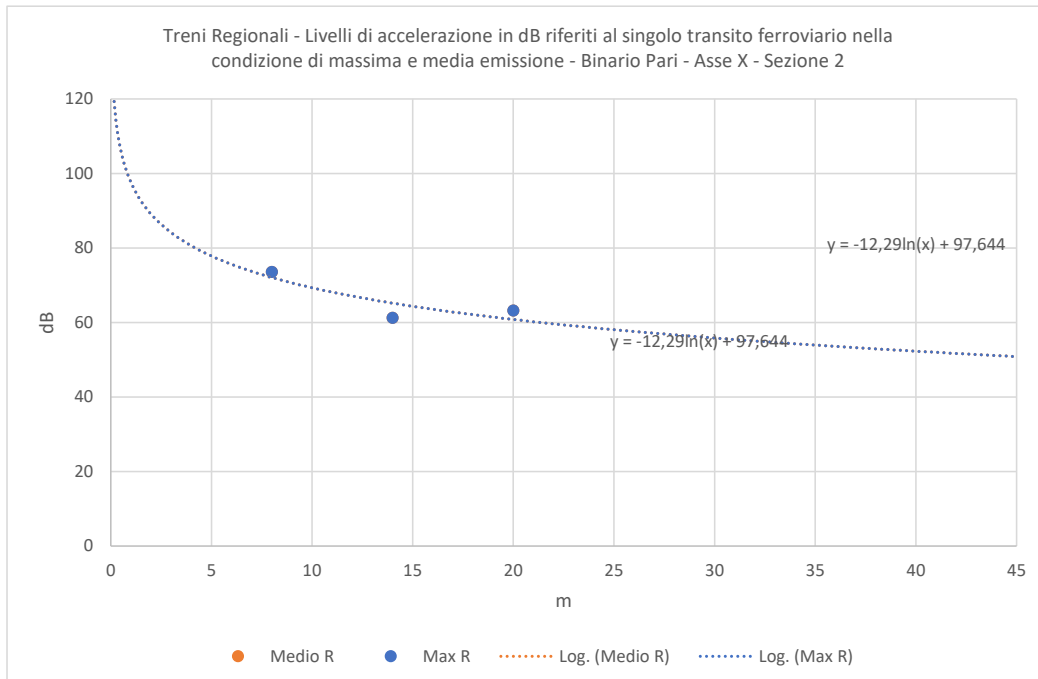


Figura 5-8 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno sulla base dei dati sperimentali lungo l'asse Y per la tipologia di treno regionale nella condizione di massima e media emissione.

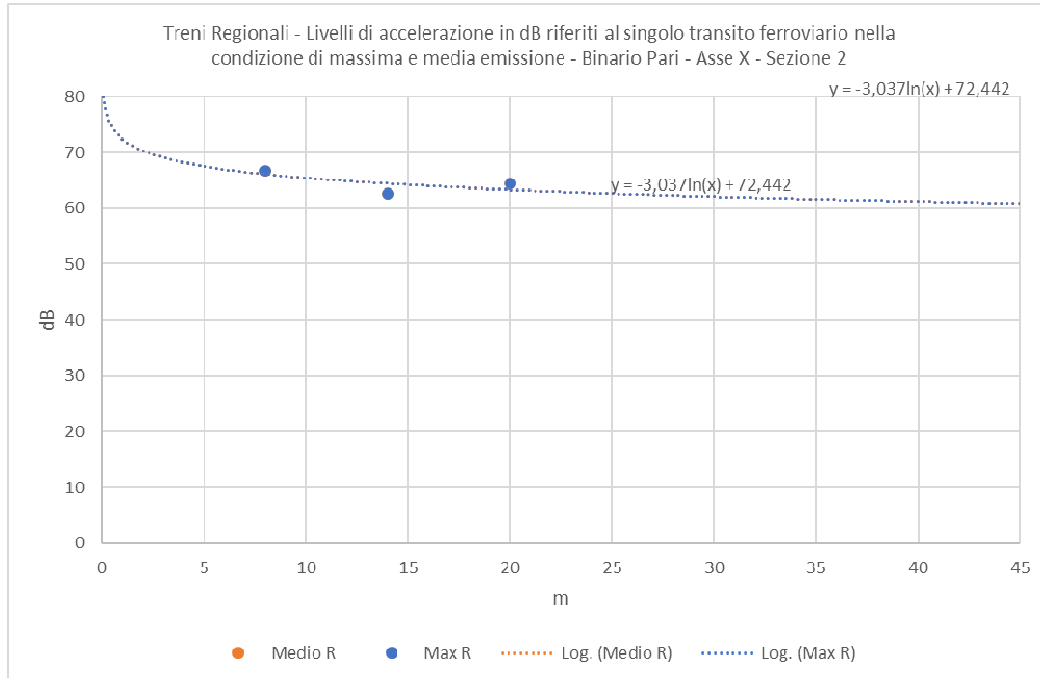


Figura 5-9 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno sulla base dei dati sperimentali lungo l'asse Z per la tipologia di treno regionale nella condizione di massima e media emissione.

5.4 La propagazione delle vibrazioni nelle strutture edilizie

5.4.1 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. |

5.4.2 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.

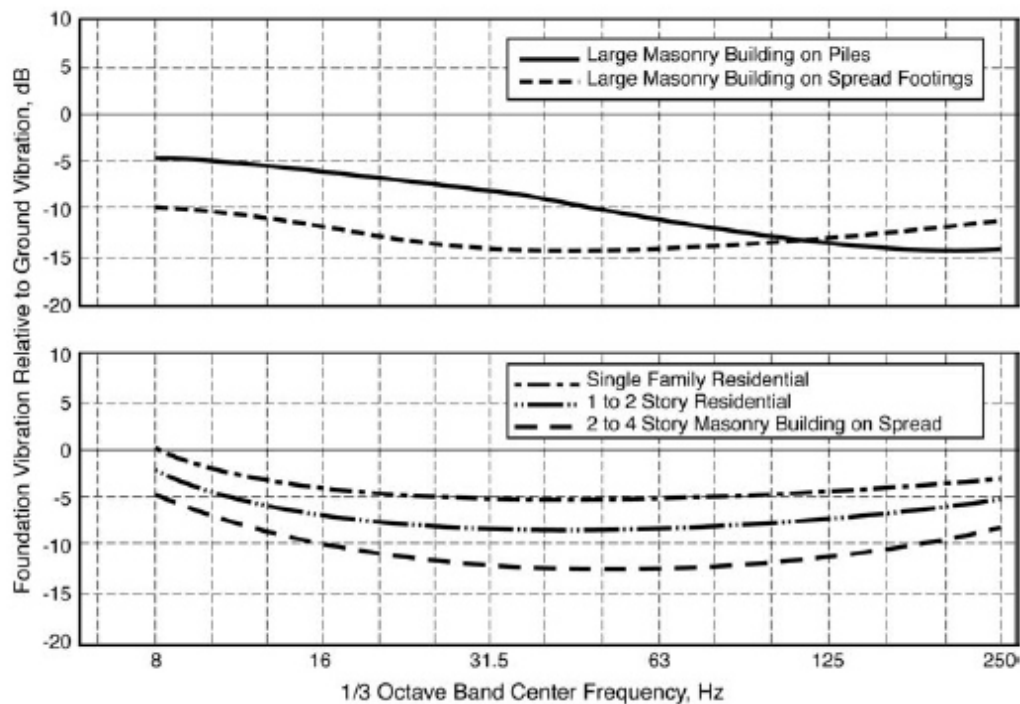


Figura 5-10 Risposta delle fondazioni per diverse tipologie di edifici (Fonte: FTA, USA)

| | | | | | | |
|--|---|------------------|-------------|------------------|-----------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA - NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA PROGETTO DEFINITIVO | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE RELAZIONE GENERALE | COMMESSA IN1M | LOTTO 11 | FASE/ENTE D22 | DOCUMENTO RG IM 0004 002 | REV. A |

5.4.3 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.

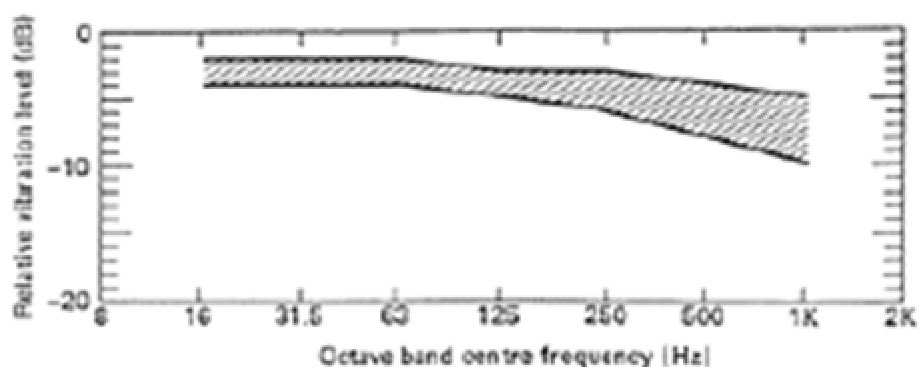


Figura 5-11 Attenuazione delle vibrazioni nel passaggio da un piano al successivo

Ungar and Bender (1975) proposero di valutare l'attenuazione delle vibrazioni attraverso l'edificio con la seguente relazione:

$$L_p = L_g - 3n \text{ [dB]}$$

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).

Viene quindi calcolata una riduzione di 3 dB per ogni piano.

5.4.4 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 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.

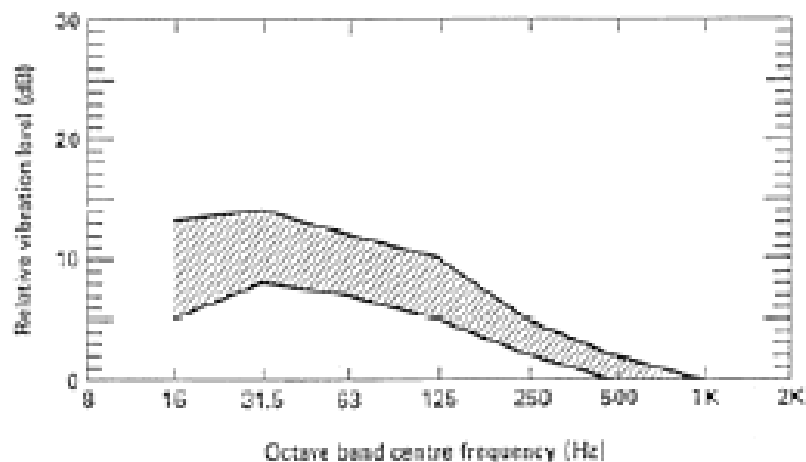



Figura 5-12 Amplificazione prodotta dai solai

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|------------------|-----------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA - NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA PROGETTO DEFINITIVO | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE RELAZIONE GENERALE | COMMESSA IN1M | LOTTO 11 | FASE/ENTE D22 | DOCUMENTO RG IM 0004 002 | REV. A |

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 +12 dB rispetto ai livelli sul terreno.

5.4.5 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.

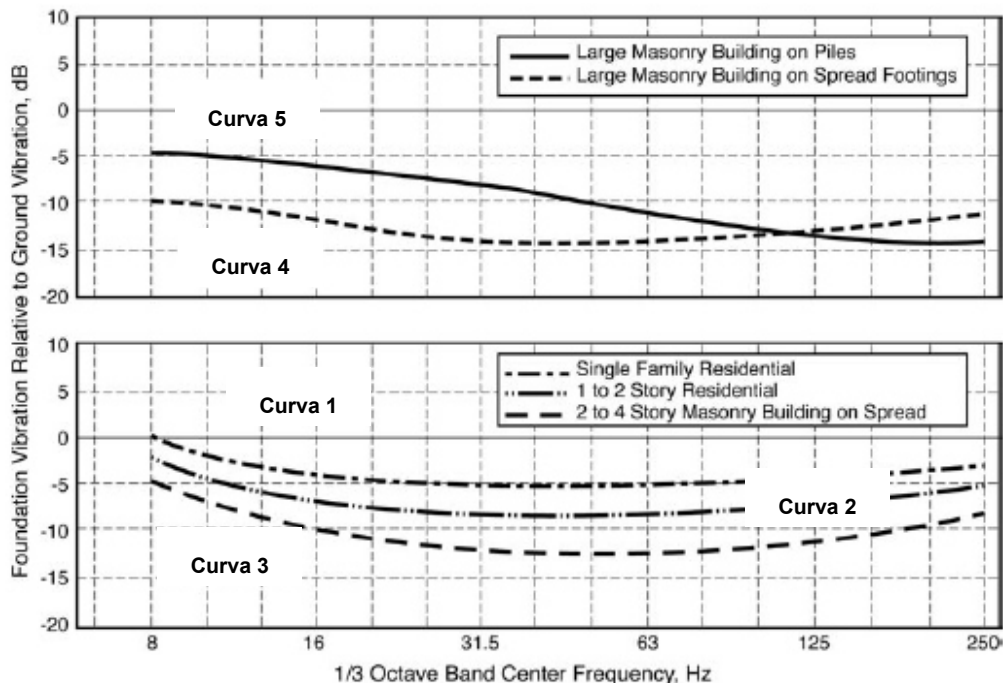


Figura 5-13 Fattori correttivi dovuti alla tipologia di fondazione

Le tipologie edilizie prevalenti in adiacenza al tracciato sono rappresentate da edifici storici in muratura, con fondazioni direttamente immerse nel terreno e edifici di recente edificazione con ossatura in cemento armato e fondazioni continue. 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.

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 linee ferroviarie italiane.

5.4.6 Rumore trasmesso per via solida dalle strutture

Il rumore solido all'interno degli edifici è il risultato delle onde acustiche irradiate dalle superfici della stanza, includendo le pareti, i pavimenti, i soffitti e tutti gli altri elementi normalmente presenti quali finestre, porte, ecc. La relazione tra le ampiezze di vibrazione delle superfici della stanza ed i livelli di pressione sonora all'interno della stanza stessa è

funzione del valore medio del coefficiente di assorbimento acustico che caratterizza le superfici, dalla dimensione e forma della stanza e della distribuzione del campo di vibrazione sulle superfici vibranti.

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

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

dove:

L_p è il livello di pressione sonora in dB (0 dB = 20 μ Pa);

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

F è la frequenza per bande a terzi di ottava in Hz.

L'applicazione del modello di propagazione del rumore solido per i ricettori analizzati nel presente studio non evidenziano situazioni di criticità preventivabili. Lo stato degli infissi di ciascun edificio, classificato "buono" in fase di censimento ricettori, potrebbe ridurre notevolmente l'insorgere di condizioni di attenzione per gli stessi ricettori potenzialmente interessati da livelli di vibrazioni disturbanti, qualora i vetri entrino in risonanza, vibrino ed emettano all'interno del locale un rumore avente le medesime frequenze.

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---|-------------------------|
|  | LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA - NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA PROGETTO DEFINITIVO | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE RELAZIONE GENERALE | COMMESSA IN1M | LOTTO 11 | FASE/ENTE D22 | DOCUMENTO RG IM 0004 002 | REV. A |


6 LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO

6.1 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. L'individuazione delle criticità che si potranno verificare con la realizzazione del progetto ha reso indispensabile determinare preventivamente i criteri di valutazione della sensibilità del territorio: a tale scopo è stato utilizzato come riferimento il censimento dei ricettori eseguito nell'ambito dello studio acustico. Per quanto riguarda l'individuazione di criticità, in via cautelativa, si è fatto riferimento ai limiti indicati dalla norma ISO 2631/UNI 9614:1990 per le vibrazioni di livello costante, in particolare per la condizione di postura del corpo non nota, per la quale si indicano soglie uguali per tutti i tre assi di riferimento (x, y, z) di 77 dB per il giorno e 74 dB per la notte, per ambiti residenziali. Ciò, pertanto, senza tener conto dei valori di riferimento suggeriti dalla medesima norma nel caso di vibrazioni prodotte da veicoli ferroviari (89,5 dB per l'asse Z - 86,7 dB per gli assi X e Y). Questi sono stati considerati esclusivamente per la condizione riferita al singolo transito di un convoglio ferroviario secondo l'emissione massima riscontrata durante le campagne di rilievo di caratterizzazione della sorgente. Applicando i modelli di calcoli precedentemente descritti, le funzioni di trasferimento sperimentali e attraversamenti litologici tipici dell'area in esame, i dati di caratterizzazione dei singoli transiti massimi e medi e tipologie edilizie sia in c.a. sia in muratura (con luci di solaio di 4 m), si è giunti al calcolo della distanza dalla sorgente a cui il livello di accelerazione ponderato 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 citato Manuale di Progettazione RFI delle Opere Civili, 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, esclusivamente in caso di tracciato in

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|--------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------|
|  | LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA - NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA PROGETTO DEFINITIVO | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE RELAZIONE GENERALE | COMMESSA IN1M | LOTTO 11 | FASE/ENTE D22 | DOCUMENTO RG IM 0004 002 | REV. A |

sotterraneo. Pertanto, nello studio in essere, non si è ricorso al confronto con detti limiti per i singoli transiti.

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 alla linea di progetto.

Si evidenzia infatti, che per tale studio non si è fatto riferimento alla sovrapposizione degli effetti dovuti alla coesistenza con le linee concorsuali, in quanto lo studio è finalizzato alla valutazione del solo disturbo indotto dalla linea in progetto e all'individuazione delle eventuali specifiche soluzioni mitigative.

Ai fini dell'applicazione del modello previsionale sono stati considerati i seguenti dati di input:

- Per il modello di esercizio previsto, di seguito si riporta uno schematico relativo al periodo diurno e al periodo notturno
- Per le velocità si considerano:
 - Tratto di ingresso
 - Treni Eurostar e Regionali 110 km/h
 - Merci 60 km/h
 - Tratto scalo merci
 - Treni Eurostar e Regionali 100 km/h
 - Merci 60 / 30 / 0 km/h

In particolare, per i treni merci, alcuni si attestano nello scalo, per cui con velocità nulla, altri sono passanti a 60 km/h e altri con velocità 30 km/h. In via cautelativa, si considerano tutti alla velocità di 60 km/h.

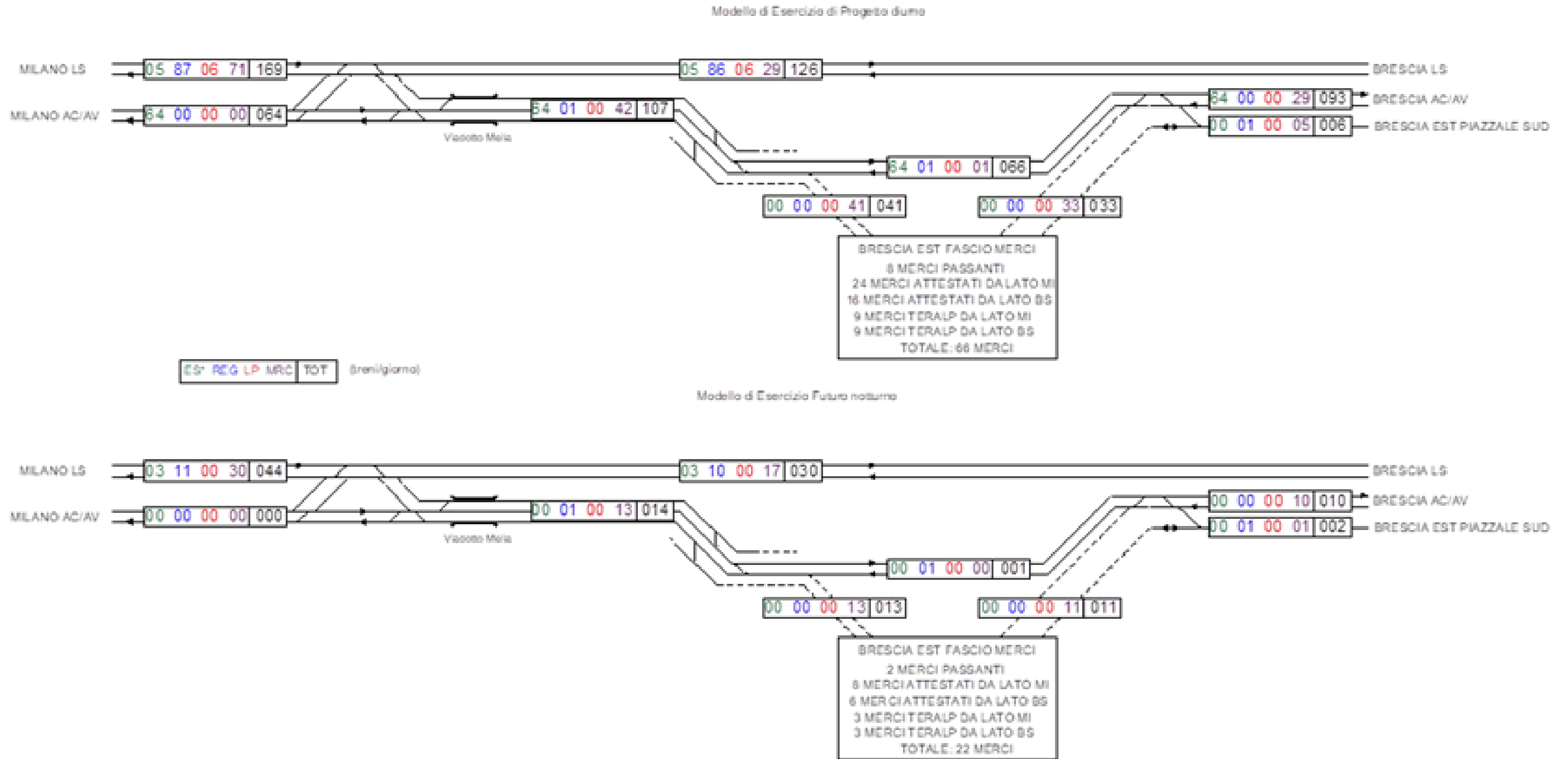


Figura 6-1 - Indicazione schematica delle tratte di intervento in progetto con indicazione dei traffici ferroviari.

6.3 Livelli vibrazionali indotti

Individuazione dei livelli emissivi

Le accelerazioni complessivamente prodotte dall'esercizio della linea ferroviaria di progetto sono fornite dall'applicazione dell'emissione delle singole tipologie di treno e verso di percorrenza al traffico di esercizio previsto, in riferimento alle postazioni di indagine effettuate e tenendo conto del tempo di esposizione medio. Nelle tabelle seguenti si evincono per i tre assi di riferimento X, Y e Z e nelle tre postazioni T1, T2 e T3 di riferimento il valore complessivo di esposizione nel periodo diurno e nel periodo notturno calcolato sulla base del modello di esercizio atteso e delle velocità di percorrenza. Inoltre, è stato considerato un fattore di correzione per tener conto della differenza tra il livello vibrazionale nel terreno e quello all'interno dell'edificio che, nel caso specifico per le motivazioni dette nel capitolo precedente si stima essere cautelativamente di +5 dB relativamente alla sola componente Z per l'effetto di risonanza del solaio.

La valutazione è eseguita considerando l'intero modello di esercizio nell'arco delle 24 ore, differenziando le analisi tra periodo diurno e notturno.

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

Di seguito si riportano i valori corrispondenti agli scenari considerati, tratti al fine di verificare il rispetto dei limiti.

| Postazione | Lw,eq [dB] Diurno | | | Lw,eq [dB] Notturno | | |
|----------------------|-------------------|------|------|---------------------|------|------|
| | X | Y | Z | X | Y | Z |
| T1 (5 m da binario) | 61,6 | 63,2 | 57,8 | 57,2 | 58,7 | 52,0 |
| T2 (15 m da binario) | 44,3 | 48,6 | 53,1 | 38,2 | 43,3 | 46,4 |
| T3 (25 m da binario) | 44,3 | 46,8 | 52,0 | 37,4 | 40,3 | 45,3 |

Tabella 6-1 Livelli di accelerazione Lw,eq in dB all'interno degli edifici nel periodo diurno e notturno lungo gli assi X, Y e Z complessivamente attesi secondo il programma di esercizio previsto. Valori emissivi medi.

Considerando quindi i livelli di emissione complessivi, dall'applicazione del modello previsionale individuato, si evince che il livello limite diurno di 77 dB per le abitazioni nel periodo diurno e ugualmente il livello limite notturno di 74 dB per le abitazioni nel periodo

notturno, viene raggiunto internamente agli edifici ad una distanza di circa 2 metri dal binario esterno.

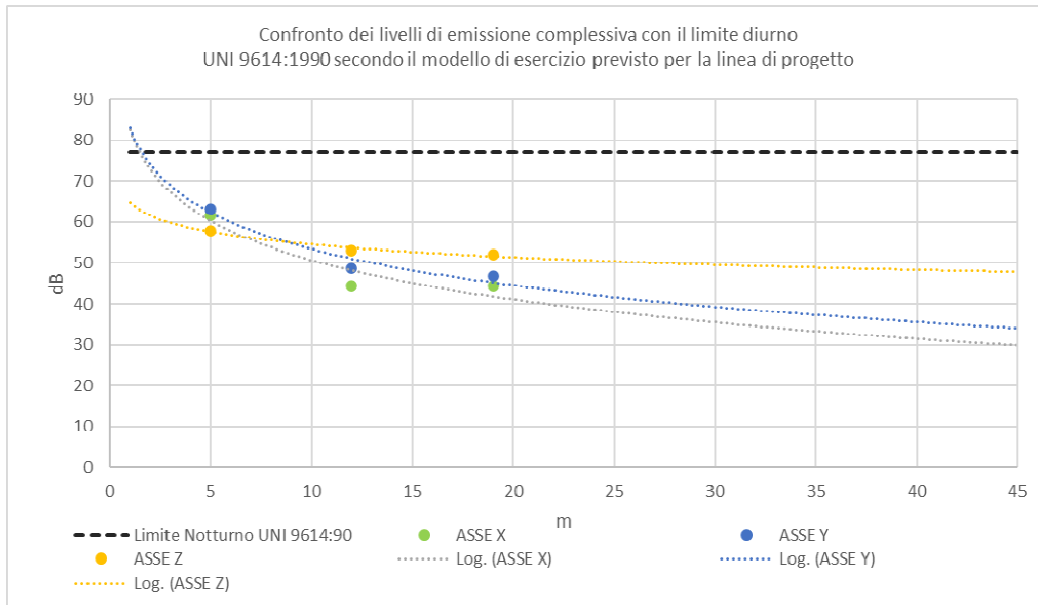


Figura 6-2 Confronto dei livelli di emissione complessiva all'interno degli edifici con i limiti UNI 9614:1990 in funzione della distanza dal binario secondo il modello di esercizio previsto – Periodo diurno.

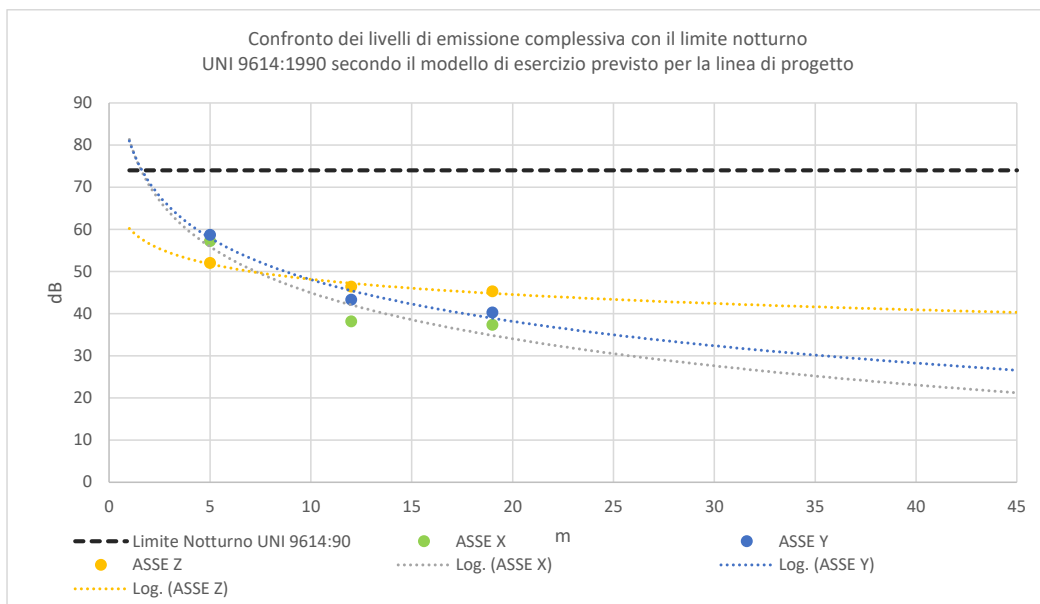


Figura 6-3 Confronto dei livelli di emissione complessiva all'interno degli edifici con i limiti UNI 9614:1990 in funzione della distanza dal binario secondo il modello di esercizio previsto – Periodo notturno, tratta M.

| | | | | | | |
|---|--|---------------------------|--------------------------------|---|-------------------------|----------------------------------|
|  | LINEA A.V./A.C. MILANO-VERONA - NODO DI BRESCIA POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA PROGETTO DEFINITIVO | | | | | |
| STUDIO VIBRAZIONALE RELAZIONE GENERALE | COMMESSA IN1M | LOTTO 11 | FASE/ENTE D22 | DOCUMENTO RG IM 0004 002 | REV. A | FOGLIO 40 di 40 |

6.4 Individuazione delle potenziali aree critiche

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

Dall'applicazione dell'algoritmo di calcolo si evince come il transito dei convogli ferroviari previsti nel programma di esercizio, possa considerarsi del tutto trascurabile essendo la distanza critica, entro cui si determina un eventuale superamento dei limiti normativi, pari a 2 metri dal binario esterno.

Dalla planimetria del censimento ricettori dello studio acustico (rif. Elaborato cod. IN1010D22SHIM0004001A_2A_3A) si evince che i ricettori presenti durante la fase futura di esercizio risulteranno tutti posizionati a distanza superiore a quella critica indicata (entro la quale si verificano i superamenti dei limiti) e pertanto, fermo restando le condizioni di carico diurne e notturne della linea, come quelle indicate nel presente studio, non risulteranno per il futuro esercizio superamenti dei limiti normativi per tutti i ricettori presenti.