

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O. ARCHITETTURA AMBIENTE E TERRITORIO

PROGETTO DEFINITIVO

RADDOPPIO PONTE S.PIETRO - BERGAMO - MONTELLO

LOTTO 2: PRG PONTE SAN PIETRO E RADDOPPIO DELLA LINEA DA CURNO A BERGAMO

STUDIO VIBRAZIONALE

Relazione generale

SCALA:

--:--

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

NB1R 02 D 22 RG IM0004 002 A

| Rev. | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | Autorizzato Data |
|------|---------------------|-------------|--------------|------------|--------------|---------------|--------------|----------------------------|
| A | Emissione esecutiva | C. Glanoble | Ottobre 2019 | | Ottobre 2019 | I. Legramandi | Ottobre 2019 | D. Ludovld Ottobre 2019 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |



| | | | | | | |
|---|--|------------------|----------------|-------------------------|-----------|-------------------|
|  | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELLO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo | | | | | |
| | PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A | FOGLIO 1 di 23 |

Indice

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | RIFERIMENTI NORMATIVI | 2 |
| 1.1 | IL QUADRO DELLE NORME DI RIFERIMENTO..... | 2 |
| 2 | AREA DI STUDIO..... | 7 |
| 3 | INDAGINI VIBRAZIONALI | 8 |
| 3.1 | RILIEVI DI VIBRAZIONI IN SITU | 8 |
| 3.2 | SINTESI DEI DATI RILEVATI..... | 9 |
| 4 | MODELLO PREVISIONALE..... | 11 |
| 4.1 | LE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO | 11 |
| 4.2 | CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE DI VIBRAZIONI | 11 |
| 4.2.1 | Interazione ruota-rotaia | 11 |
| 4.2.2 | Velocità dei treni..... | 13 |
| 4.3 | LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO | 14 |
| 4.3.1 | La propagazione delle onde vibrazionali..... | 14 |
| 4.3.2 | La determinazione della funzione di trasferimento..... | 16 |
| 5 | LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO | 18 |
| 5.1 | PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO | 18 |
| 5.2 | INDIVIDUAZIONE DELLE POTENZIALI AREE CRITICHE..... | 20 |
| 6 | CONCLUSIONI..... | 22 |

| | | | | | | |
|--|---|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELLLO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A |

1 RIFERIMENTI NORMATIVI

1.1 IL QUADRO DELLE NORME DI RIFERIMENTO

A differenza del rumore ambientale, regolamentato a livello nazionale dalla Legge Quadro n. 447/95, non esiste al momento alcuna legge che stabilisca limiti quantitativi per l'esposizione alle vibrazioni. Esistono invece numerose norme tecniche, emanate in sede nazionale ed internazionale, che costituiscono un utile riferimento per la valutazione del disturbo in edifici interessati da fenomeni di vibrazione.

Per quanto riguarda il disturbo alle persone, i principali riferimenti sono costituiti dalla norma ISO 2631 / Parte 2 "Evaluation of human exposure to whole body vibration / "Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz)". La norma assume particolare rilevanza pratica poiché ad essa fanno riferimento le norme tecniche per la redazione degli Studi di Impatto Ambientale relativi alla componente ambientale "Vibrazioni", contenute nel D.P.C.M. 28/12/1988. Ad essa, seppur con alcune non trascurabili differenze, fa riferimento la norma UNI 9614 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo".

Si riporta di seguito la principale normativa tecnica esistente in riferimento all'aspetto ambientale vibrazioni.

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

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

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

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

L'Annex A della ISO 2631-2 (che non rappresenta peraltro parte 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,

| | | | | | | |
|--|---|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A |

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 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo"

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

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

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

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

Considerato che gli effetti prodotti dalle vibrazioni sono differenti a seconda della frequenza delle accelerazioni, vanno impiegati dei filtri che ponderano le accelerazioni a seconda del loro effetto sul soggetto esposto. Tali filtri rendono tutte le componenti dello spettro equivalenti in termini di percezione e quindi di disturbo. I simboli dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza e del corrispondente livello sono rispettivamente, a_w e L_w . Quest'ultimo, espresso in dB, è definito come $L_w = 20 \log_{10} (a_w / 10^{-6} \text{ ms}^{-2})$. Il filtro per le accelerazioni che si trasmettono secondo l'asse z prevede una attenuazione di 3 dB per ottava tra 4 e 1 Hz, una attenuazione nulla tra 4 e 8 Hz ed una attenuazione di 6 dB per ottava tra 8 e 80 Hz. Il filtro per le accelerazioni che si trasmettono secondo gli assi x e y prevede un'attenuazione nulla tra 1 e 2 Hz e una attenuazione di 6 dB per ottava tra 2 e 80 Hz. La banda di frequenza 1-80 Hz deve essere limitata da un filtro passabanda con una pendenza asintotica di 12 dB per ottava. Nel caso la postura del soggetto esposto non sia nota o vari nel tempo, va impiegato il filtro definito nel prospetto I della norma, ottenuto considerando

| | | | | | | |
|---|--|------------------|----------------|-------------------------|-----------|-------------------|
|  | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELLO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo | | | | | |
| | PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A | FOGLIO 4 di 23 |

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, che non costituisce parte integrante della norma, si indica che la valutazione del disturbo associato alle vibrazioni di livello costante deve essere svolta confrontando i valori delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza, o i corrispondenti livelli più elevati riscontrati sui tre assi, con una serie di valori limite riportati nei prospetti II e III. Quando i valori o i livelli delle vibrazioni in esame superano i limiti, le vibrazioni possono essere considerate oggettivamente disturbanti per il soggetto esposto. Nel caso di vibrazioni di tipo impulsivo è necessario misurare il livello di picco dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza; tale livello deve essere successivamente diminuito di 3 dB al fine di stimare il corrispondente livello efficace. I limiti possono essere adottati se il numero di eventi impulsivi giornalieri non è superiore a 3. Nel caso si manifestino più di 3 eventi impulsivi giornalieri i limiti fissati per le abitazioni, gli uffici e le fabbriche vanno diminuiti in base al numero di eventi e alla loro durata, moltiplicandoli per un fattore correttivo F. Nessuna riduzione può essere applicata per le aree critiche. Nel caso di impulsi di durata inferiore a 1 s si deve porre $F = 1.7 \cdot N - 0.5$. Per impulsi di durata maggiore si deve porre $F = 1.7 \cdot N - 0.5 \cdot t - k$, con $k = 1.22$ per pavimenti in calcestruzzo e $k = 0.32$ per pavimenti in legno. Qualora i limiti così calcolati risultassero inferiori ai limiti previsti per le vibrazioni di livello stazionario, dovranno essere adottati questi ultimi valori.

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

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

| | | | | | | |
|---|--|------------------|----------------|-------------------------|-----------|-------------------|
|  | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELLO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo | | | | | |
| | PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A | FOGLIO 5 di 23 |

semplificata per la classificazione degli edifici secondo la loro probabile reazione alle vibrazioni meccaniche trasmesse attraverso il terreno. Nell'ambito di questa classificazione, un sistema dinamico è costituito dal terreno e dallo strato di base (magrone) sul quale si trovano le fondazioni oltre che la struttura medesima dell'edificio.

Le strutture comprese nella classificazione riguardano:

- tutti gli edifici residenziali e gli edifici utilizzati per le attività professionali (case, uffici, ospedali, case di cura, ecc.);
- gli edifici pubblici (municipi, chiese, ecc.);
- edifici vecchi ed antichi con un valore architettonico, archeologico e storico;
- le strutture industriali più leggere spesso concepite secondo le modalità costruttive in uso per gli edifici abitativi.

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

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

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

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

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

| | | | | | | |
|--|---|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A |

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

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

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

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

| | | | | | | |
|---|--|------------------|----------------|-------------------------|-----------|-------------------|
|  | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELLO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo | | | | | |
| | PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A | FOGLIO 7 di 23 |

2 AREA DI STUDIO

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

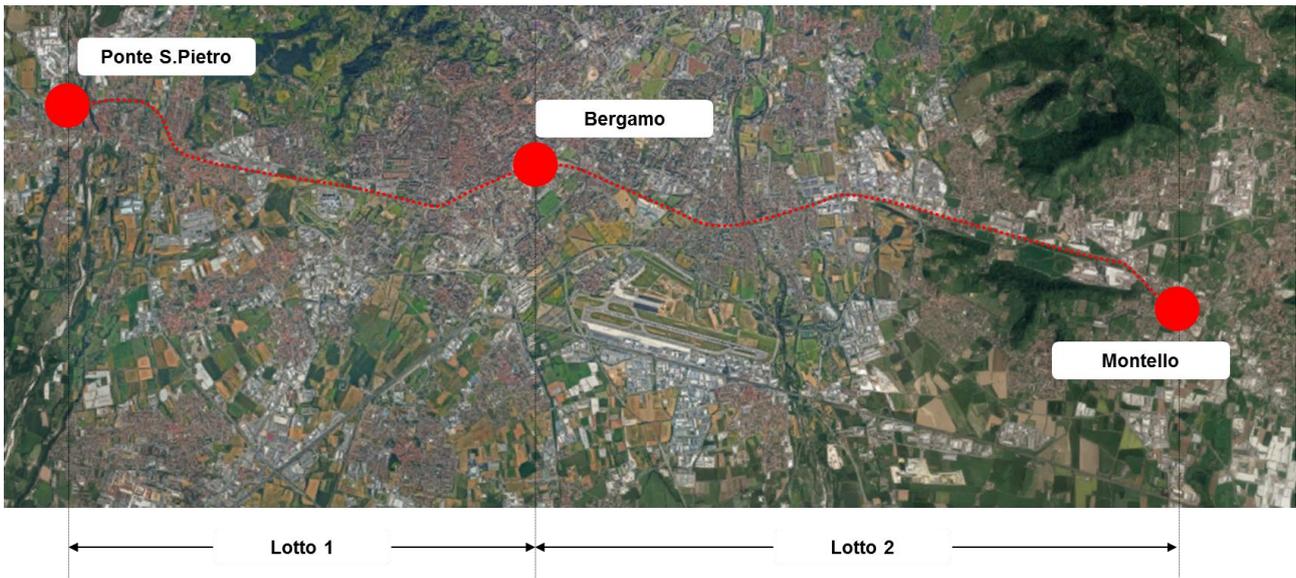


Figura 2-1 Vista aerea dell'inquadramento generale dell'intervento oggetto di studio

L'area di intervento è lungo l'attuale linea ferroviaria che si sviluppa da Ponte S. Pietro a Bergamo per poi proseguire in direzione Montello a est del capoluogo. Il territorio è caratterizzato da una morfologia pianeggiante con presenza di aree industriali e residenziali ad alta densità abitativa.

| | | | | | | |
|---|---|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A |

3 INDAGINI VIBRAZIONALI

3.1 RILIEVI DI VIBRAZIONI IN SITU

E' stata eseguita una campagna di rilievi vibrometrici in corrispondenza di due sezione lungo l'attuale linea ferroviaria oggetto di studio. Tale attività è finalizzata alla caratterizzazione della propagazione delle vibrazioni ferroviarie allo stato attuale secondo l'attuale assetto infrastrutturale della linea ferroviaria e della tipologia di convogli ferroviari.

Come detto l'indagine è stata eseguita in due sezioni distinte della linea ferroviaria. La prima sezione (VIB01) è in corrispondenza della città di Bergamo nel tratto compreso tra la stazione centrale e quella dell'ospedale. Tale sezione è caratterizzata da un corpo ferroviario a raso di altezza pari a circa 0,5 m da piano campagna.

La seconda sezione (VIB02) è nel territorio del Comune di Albano S.Alessandro in un tratto della linea ferroviaria a raso.

Ciascuna misura ha una durata pari a 24 ore durante la quale sono state rilevate le emissioni vibrazionali indotte dai convogli ferroviari transitanti sia nel periodo diurno che notturno. Ciascuna sezione di indagine è costituita da tre terne accelerometriche in grado di rilevare le immissioni vibrazionali totali e specifiche dei transiti ferroviari lungo i tre assi X, Y e Z.

Durante l'arco temporale di osservazione sono stati rilevati i livelli vibrazionali indotti da un totale di 72 treni per la sezione VIB01 e 42 per la sezione VIB02. La velocità di percorrenza



Figura 3-1 Localizzazione dei punti di misura T1, T2 e T3 per il punto VIB01

| | | | | | | |
|---|---|------------------|----------------|-------------------------|-----------|-------------------|
|  | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo | | | | | |
| | PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A | FOGLIO 9 di 23 |



Figura 3-2 Localizzazione dei punti di misura T1, T2 e T3 per il punto VIB02

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

- Punto misura VIB01:
 - Terna 1 (T1): in prossimità dei binari, a circa 10 metri dall’asse del binario più esterno, su terreno sciolto;
 - Terna 2 (T2): a circa 20 metri dai binari dell’asse più esterno su un terreno analogo a quello della Terna 1;
 - Terna 3 (T3): a circa 30 metri dai binari su un terreno analogo a quello delle Terne 1 e 2 in prossimità dell’edificio su superficie pavimentata.
- Punto misura VIB02:
 - Terna 1 (T1): in prossimità dei binari, a circa 10 metri dall’asse del binario più esterno, su terreno sciolto;
 - Terna 2 (T2): a circa 20 metri dai binari dell’asse più esterno su un terreno analogo a quello della Terna 1;
 - Terna 3 (T3): a circa 30 metri dai binari su un terreno analogo a quello delle Terne 1 e 2.

3.2 SINTESI DEI DATI RILEVATI

Le misure, finalizzate esclusivamente alla caratterizzazione della sorgente emissiva ferroviaria da utilizzare nel modello previsionale per la valutazione delle condizioni di esposizione alle vibrazioni

| | | | | | | |
|---|--|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELLO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A |

lungo la linea oggetto di studio, si riferiscono ad un periodo di osservazione pari a 24 ore per un totale di 72 transiti per la sezione VIB01 e 42 transiti per la sezione VIB02. Tutti i transiti ferroviari rilevati sono connessi al servizio passeggeri.

I valori di accelerazione rilevati lungo i tre assi di riferimento dai tre vibrometri posizionati nei punti T1, T2 e T3, posti in corrispondenza di ciascuna sezione di indagine, sono riportati tati nell'elaborato allegato NB1R01D22RHIM0004002A.

Di seguito, si riporta una tabella di sintesi con indicati, per ciascuna sezione e terna di misura, i valori medi delle accelerazioni dei livelli equivalenti espressi in decibel calcolati a partire dai valori misurati per ciascun treno transitante. Al fine di utilizzare tali dati sperimentali per identificare le condizioni di propagazione delle vibrazioni nel terreno, si fa riferimento al valore medio del livello equivalente misurato nelle due postazioni.

Per entrambe le sezioni di misura tutti i transiti campionati sono riferiti alla tipologia di treni passeggeri, con una percentuale elevata di treni connessi al servizio regionale locale a composizione fissa (100% nel caso della sezione VIB01, oltre l'80% per quella VIB02). L'individuazione dei valori medi si riferisce pertanto ai valori medi complessivamente rilevati durante il periodo di campionamento e riportati nei report di misura.

| Postazione | T1-X | T1-Y | T1-Z | T2-X | T2-Y | T2-Z | T3-X | T3-Y | T3-Z |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| VIB01 | 86.4 | 86.6 | 86.3 | 81.4 | 80.5 | 79.6 | 58.0 | 57.3 | 56.6 |
| VIB02 | 82.5 | 84.0 | 86.0 | 82.2 | 81.6 | 80.8 | 79.4 | 77.8 | 76.5 |
| Media | 84.9 | 85.5 | 86.2 | 81.8 | 81.1 | 80.2 | 76.4 | 74.8 | 73.5 |

Tabella 3-1 Livello equivalente medio (Lw medio) delle accelerazioni indotte dai transiti ferroviari per ciascuna sezione di indagine e calcolo del valore medio

Come si evince dall'analisi della tabella, si ottengono valori decrescenti all'aumentare della distanza dall'asse ferroviario per le tre terne.

| | | | | | | |
|---|--|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELLO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo | | | | | |
| | PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A | FOGLIO 11 di 23 |

4 MODELLO PREVISIONALE

4.1 LE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO

L'esercizio di una linea ferroviaria è fonte di sollecitazioni dinamiche nel terreno circostante. Le cause di tali vibrazioni sono da ricondursi all'interazione del sistema veicolo/armamento/struttura di sostegno e dipendono da diversi fattori quali la tipologia di convoglio, le velocità di esercizio le caratteristiche dell'armamento, la tipologia di terreni e non ultimo le caratteristiche strutturali dei fabbricati.

Le vibrazioni sono in grado di determinare effetti indesiderati sulla popolazione esposta e sugli edifici. Il disturbo sulle persone, classificato come "annoyance", dipende in misura variabile dall'intensità e frequenza dell'evento disturbante e dal tipo di attività svolta. Le vibrazioni possono causare danni agli edifici in alcune situazioni, o in presenza di caratteristiche di estrema suscettività strutturale o di elevati e prolungati livelli di sollecitazione dinamica. Tale situazioni si verificano tuttavia in corrispondenza di livelli di vibrazione notevoli, superiori di almeno un ordine di grandezza rispetto ai livelli tipici dell'annoyance.

Nel caso specifico il territorio interessato dal progetto è di tipo pianeggiante caratterizzato dall'alternarsi di aree industriali, agricole e residenziali a bassa densità abitativa con tipologia edilizia residenziale a più livelli in parte con struttura in muratura e in parte con struttura in c.a.

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

4.2 CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE DI VIBRAZIONI

4.2.1 Interazione ruota-rotaia

La sorgente di vibrazioni ferroviaria consiste nel movimento del treno lungo le rotaie e dalle conseguenti forze che nascono nell'interazione fra ruota, rotaia e struttura di appoggio della rotaia. I treni, in fase di riposo, esercitano una forza statica data dal peso trasmesso dalle ruote alle rotaie e distribuito dalla rotaia stessa, dalle traversine, dal supporto (ballast...) e dal terreno: si tratta del carico statico. Quando il treno si mette in movimento questa forza si sposta insieme al treno stesso, ma a causa delle imperfezioni e irregolarità superficiali di ruota, rotaia nonché delle variazioni nel tipo di supporto della rotaia il carico statico eserciterà una forza dinamica, che si trasforma in vibrazioni generate nel punto di contatto ruota-rotaia e trasmesse nel terreno circostante. I parametri che influenzano il livello e le caratteristiche delle vibrazioni indotte dal passaggio del treno sono:

| | | | | | | |
|---|--|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELLO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo | | | | | |
| | PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A | FOGLIO 12 di 23 |

- **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. Le imperfezioni superficiali della rotaia e della ruota sono la causa principale delle vibrazioni: le tipiche irregolarità superficiali delle ruote sono zone lisce (piatte) dovute alla frenatura. Le irregolarità della rotaia possono essere costituite 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. Altre cause di vibrazione sono le curve, accelerazioni/decelerazioni del treno, guida instabile dei veicoli, etc.

Le variazioni nella struttura di supporto delle rotaie dipendono dalla geometria, rigidità e spaziatura fra le traversine. una traversina può perdere il contatto con il ballast sottostante, oppure si può verificare che una traversina sia supportata dal ballast meglio di quelle circostanti: in questo caso essa genererà una maggiore resistenza al passaggio del treno. 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

| | | | | | | |
|---|---|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A |

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 % |

Il tipico spettro di frequenza generato dal transito di treni in gallerie è compreso fra 4 Hz e alcune centinaia di Hz. Vi possono essere picchi di frequenza compresi fra 80 e 100 dB.

4.2.2 Velocità dei treni

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

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

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

dove:

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

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

| | | | | | | |
|--|---|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELLLO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A |

4.3 LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO

4.3.1 La propagazione delle onde vibrazionali

L'attenuazione geometrica

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

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

dove:

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

La propagazione delle onde nei terreni sciolti

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

| | | | | | | |
|--|---|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A |

misura maggiore per le rocce incoerenti poiché i granuli sottoposti a vibrazione perdono resistenza di attrito e quindi vengono favoriti fenomeni di scorrimento con assestamenti.

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

| Tipo di Terreno | Densità [t/m³] | Velocità di Propagazione [m/s] | Fattore di Perdita η |
|-----------------------------|--------------------------------------|---|---------------------------------|
| Roccia compatta | 2.65 | 3500 | 0.01 |
| Sabbia, limo, ghiaia, loess | 1.6 | 600 | 0.1 |
| Argilla, terreni argillosi | 1.7 | 1500 | 0.2÷0.5 |

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

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

dove:

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

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

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

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

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

dove:

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

| | | | | | | |
|---|---|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo | | | | | |
| | PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A | FOGLIO 16 di 23 |

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

4.3.2 La determinazione della funzione di trasferimento

L'esecuzione di indagini in campo ha consentito una conoscenza di tipo puntuale e più precisa delle modalità di propagazione delle vibrazioni nel terreno indotte dal transito di convogli ferroviari lungo la linea ferroviaria oggetto di studio.

In considerazione del contesto territoriale, geologico e infrastrutturale, per la costruzione del modello sperimentale sono stati utilizzati i dati rilevati dalle misure della campagna eseguita; si nota che, conoscendo la mutua distanza tra le postazioni, dai dati sperimentali è possibile estrapolare le funzioni di attenuazione che descrivono la propagazione nel terreno dell'onda vibrazionale in funzione della distanza. In considerazione dei terreni interessati dal tracciato di progetto, si è proceduto sia a valutazioni teoriche sulla propagazione, sia all'utilizzazione di una curva sperimentale di regressione per la trasmissione delle vibrazioni nel terreno lungo gli assi X, Y e Z, come riportato nell'immagine seguente (livello medio di accelerazione, ponderato per "postura non nota", in corrispondenza dei tre punti di misura).

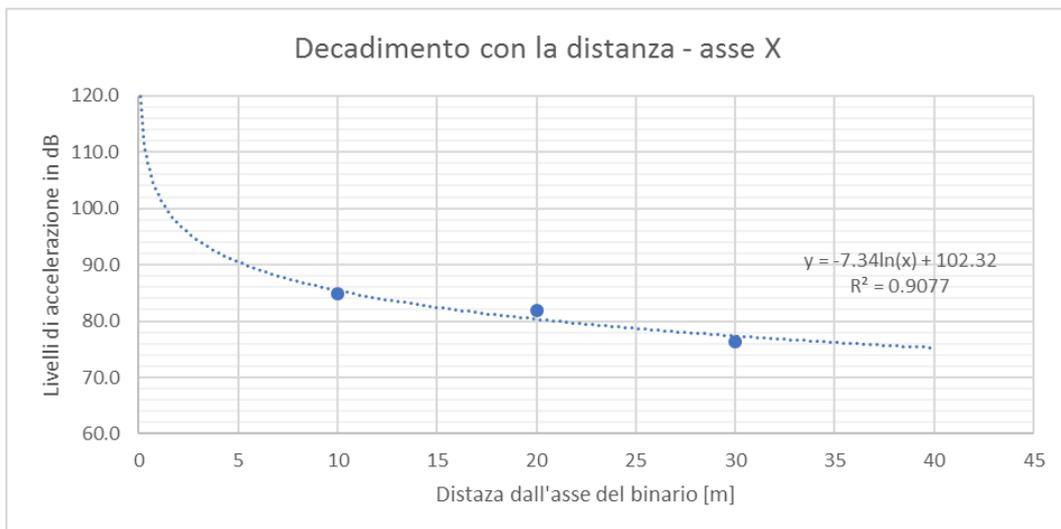


Figura 4-1 Curva di attenuazione del Leq_{te} in funzione della distanza dal binario, ricavata dai rilievi lungo l'asse X, in corrispondenza della Terna 1 (10metri), della Terna 2 (20 metri) e della Terna 3 (30 metri) e relativa al totale dei transiti ferroviari rilevati durante il periodo di osservazione.

| | | | | | | |
|---|---|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo | | | | | |
| | PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A | FOGLIO 17 di 23 |

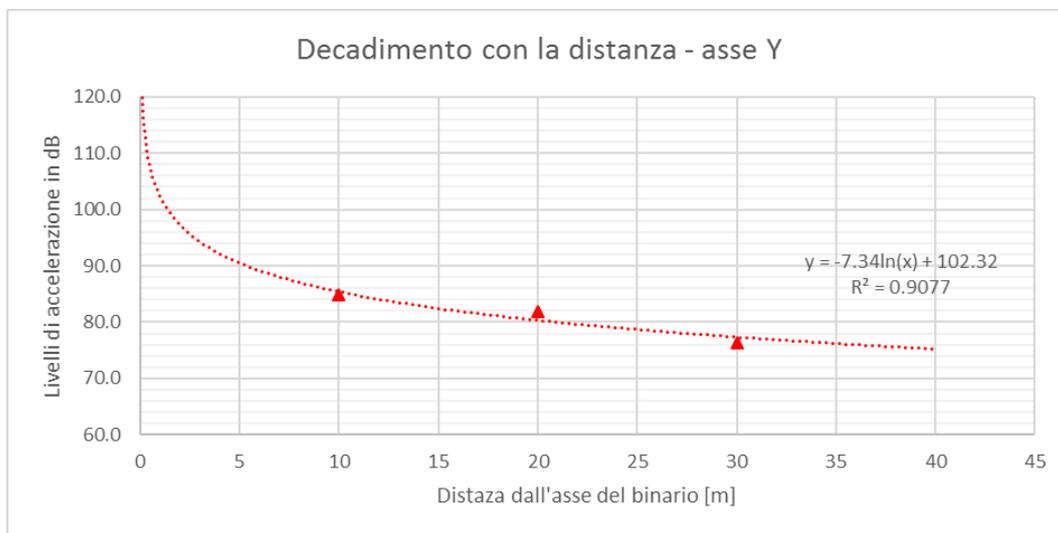


Figura 4-2 Curva di attenuazione del Leq_{te} in funzione della distanza dal binario, ricavata dai rilievi lungo l'asse Y, in corrispondenza della Terna 1 (10metri), della Terna 2 (20 metri) e della Terna 3 (30 metri) e relativa al totale dei transiti ferroviari rilevati durante il periodo di osservazione.

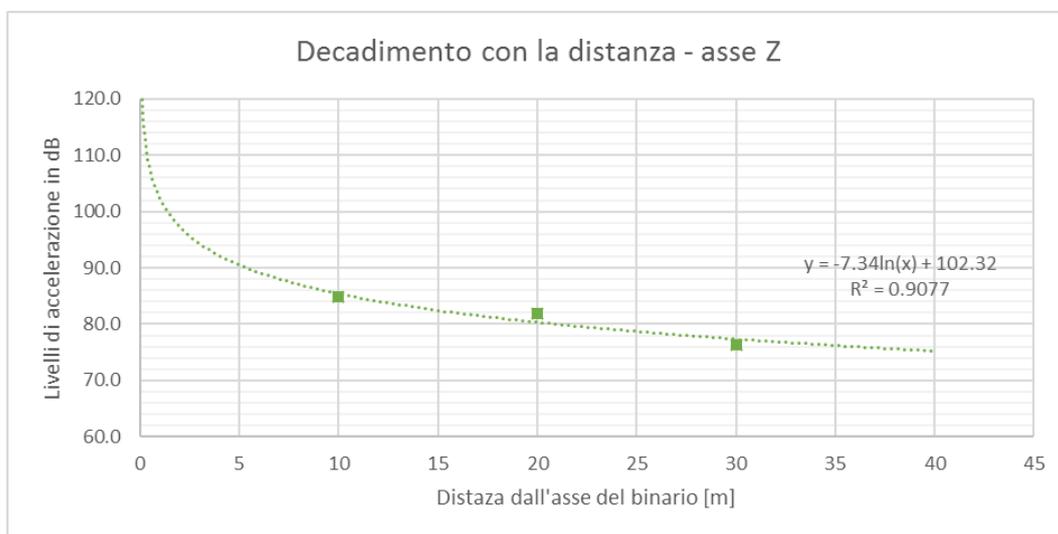


Figura 4-3 Curva di attenuazione del Leq_{te} in funzione della distanza dal binario, ricavata dai rilievi lungo l'asse Z, in corrispondenza della Terna 1 (10 metri), della Terna 2 (20 metri) e della Terna 3 (30 metri) e relativa al totale dei transiti ferroviari rilevati durante il periodo di osservazione.

| | | | | | | |
|--|--|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELLO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A |

5 LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO

5.1 PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO

Il numero di transiti previsti per la linea ferroviaria oggetto di intervento e di analisi in tale studio risultano essere i seguenti riportati in tabella.

| Tratta Ponte S.Pietro - Bergamo | | | | | |
|---|---|---|----------|--------|-----------------|
| Relazione | Composizione | Treni al giorno feriale medio complessivi nelle due direzioni | | | Velocità (Km/h) |
| | | Diurno | Notturmo | Totale | |
| Lecco – Bergamo (–Aeroporto*) | Materiale tipo Coradia ETR 245 (5 casse) | 32 | 0 | 32 | 110 |
| Milano – Porta Garibaldi – Carnate – Bergamo – Montello | Materiale tipo TSR (5 pezzi) | 64 | 8 | 72 | 110 |
| Ponte S.Pietro – Bergamo (– Aeroporto*) | Materiale tipo Coradia ETR 245 (5 casse) | 32 | 8 | 40 | 110 |

* Validazione della destinazione in corso con Regione Lombardia

Tabella 5-1 Modello di esercizio previsto dal progetto lungo la tratta Ponte S.Pietro-Bergamo

| Tratta Ponte S.Pietro - Bergamo | | | | | |
|---|---|---|----------|--------|-----------------|
| Relazione | Composizione | Treni al giorno feriale medio complessivi nelle due direzioni | | | Velocità (Km/h) |
| | | Diurno | Notturmo | Totale | |
| Bergamo – Montello / Brescia | Materiale tipo Coradia ETR 245 (5 casse) | 64 | 8 | 72 | 145 |
| Milano – Porta Garibaldi – Carnate – Bergamo – Montello | Materiale tipo TSR (5 pezzi) | 64 | 8 | 72 | 145 |
| Treni di Lunga Percorrenza | ETR 1000 | 2 | 2 | 4 | 145 |

* Si suppone che la linea per l'aeroporto di Orio al Serio, in uscita dalla stazione di Bergamo, sia indipendente e separata dalla linea per Montello, cui si riferiscono le presenti indicazioni.

Tabella 5-2 Modello di esercizio previsto dal progetto lungo la tratta Bergamo-Montello

Lo studio previsionale vibrazionale considera inoltre le vibrazioni indotte dal transito dei treni lungo la linea Treviglio Ovest – Bergamo, in quanto rientra nel corridoio di studio in affiancamento alla linea

| | | | | | | |
|---|---|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELLLO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A |

di progetto del lotto 1 in prossimità della stazione ferroviaria di Bergamo. Per tale linea i dati di traffico utilizzati risultano essere i seguenti.

| Tratta Treviglio Ovest - Bergamo | | | |
|----------------------------------|-----------------|----------|--------|
| Tipologia convogli | Numero transiti | | |
| | Diurno | Notturno | totali |
| Reg | 60 | 2 | 62 |
| Taf | 47 | 5 | 52 |
| Merci | 8 | 0 | 8 |
| TOTALI | 115 | 7 | 122 |

Tabella 5-3 Modello di esercizio considerato per la linea Treviglio Ovest – Bergamo in affiancamento alla linea Bergamo – Ponte S.Pietro

Le accelerazioni complessivamente prodotte dall'esercizio della linea ferroviaria di progetto sono stimate a partire dai valori medi rilevati durante la campagna di rilievi di caratterizzazione della sorgente emissiva per le tre postazioni lungo i tre assi e distinte per tipologia di convoglio ferroviario. In ragione del modello di esercizio previsto è stato determinato il livello di emissione complessivo indotto dal transito dei treni nei due periodi di riferimento (diurno 7-22, notturno 22-7). I valori riportati nelle tabelle seguenti si riferiscono ai livelli di accelerazione complessivi della linea ferroviaria caratterizzata allo scenario di progetto da due binari secondo la velocità di transito di progetto pari a 110 km/h nel tratto Ponte S.Pietro-Bergamo e 145 km/h nel tratto Bergamo-Montello. I valori delle accelerazioni determinate in corrispondenza delle tre terne sono stati quindi corretti in funzione della velocità di transito di progetto rispetto a quella rilevata mediamente durante la fase di indagine sul campo (80 km/h) attraverso la formula riportata nel capitolo precedente (cfr. 4.2.2).

Le distanze quindi in questo caso sono da intendersi rispetto all'asse della linea ferroviaria. Tali valori sono utilizzati per la verifica delle condizioni di propagazione delle vibrazioni sui ricettori contermini la rete ferroviaria e l'identificazione delle potenziali criticità.

Di seguito si riportano i valori calcolati lungo i tre assi ad una distanza di 10, 20, e 30m dall'asse della linea ferroviaria per le seguenti tratti:

- Linea Ponte S.Pietro - Bergamo;
- Linea Ponte S.Pietro - Bergamo in affiancamento alla linea Treviglio Ovest-Bergamo;
- Linea Bergamo – Montello.

| | | | | | | |
|--|--|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELLLO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| | STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A |

| Tratta Ponte S.Pietro-Bergamo | | | | | | | |
|-------------------------------|----------|-------------------|------|------|---------------------|------|------|
| Rilevatore | Dist [m] | Lw,eq [dB] Diurno | | | Lw,eq [dB] Notturmo | | |
| | | x | y | z | x | y | z |
| Terna 1 | 10 | 76.5 | 77.1 | 77.8 | 69.7 | 70.3 | 71.0 |
| Terna 2 | 20 | 73.0 | 72.3 | 71.4 | 66.2 | 65.4 | 64.6 |
| Terna 3 | 30 | 68.2 | 66.6 | 65.3 | 61.4 | 59.8 | 58.5 |

Tabella 5-4 Livelli equivalenti delle accelerazioni calcolate nel periodo diurno e notturno secondo il modello di esercizio futuro e una velocità di transito pari a 110 km/h lungo la tratta Ponte S.Pietro-Bergamo

| Tratta Ponte S.Pietro-Bergamo | | | | | | | |
|-------------------------------|----------|-------------------|------|------|---------------------|------|------|
| Rilevatore | Dist [m] | Lw,eq [dB] Diurno | | | Lw,eq [dB] Notturmo | | |
| | | x | y | z | x | y | z |
| Terna 1 | 10 | 79.3 | 79.9 | 80.6 | 71.3 | 71.9 | 72.6 |
| Terna 2 | 20 | 75.8 | 75.0 | 74.2 | 67.8 | 67.0 | 66.2 |
| Terna 3 | 30 | 71.0 | 69.4 | 68.1 | 63.0 | 61.4 | 60.1 |

Tabella 5-5 Livelli equivalenti delle accelerazioni calcolate nel periodo diurno e notturno secondo il modello di esercizio futuro e una velocità di transito pari a 110 km/h lungo la tratta Ponte S.Pietro-Bergamo in affiancamento alla linea Treviglio Ovest-Bergamo

| Tratta Bergamo-Montello | | | | | | | |
|-------------------------|----------|-------------------|------|------|---------------------|------|------|
| Rilevatore | Dist [m] | Lw,eq [dB] Diurno | | | Lw,eq [dB] Notturmo | | |
| | | x | y | z | x | y | z |
| Terna 1 | 10 | 79.0 | 79.6 | 80.3 | 72.1 | 72.7 | 73.4 |
| Terna 2 | 20 | 75.5 | 74.7 | 73.9 | 68.6 | 67.8 | 67.0 |
| Terna 3 | 30 | 70.7 | 69.1 | 67.8 | 63.8 | 62.2 | 60.9 |

Tabella 5-6 Livelli equivalenti delle accelerazioni calcolate nel periodo diurno e notturno secondo il modello di esercizio futuro e una velocità di transito pari a 145 km/h lungo la tratta Bergamo – Montello

5.2 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 dei valori indicati dalla norma UNI quali di riferimento per la valutazione del disturbo. Per quanto riguarda l'individuazione della potenziale criticità, in via cautelativa, si è fatto riferimento ai limiti

| | | | | | | |
|---|---|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELLO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo | | | | | |
| | PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A | FOGLIO 21 di 23 |

indicati dalle norme ISO 2631 e UNI 9616 per le vibrazioni di livello costante in una condizione di postura del corpo non nota. Ne consegue che si individua quale valore soglia, un unico per tutti e tre gli assi (X, Y e Z) e pari a 77 dB nel periodo diurno e 74 dB in quello notturno specificatamente ai ricettori residenziali.

Dai dati stimati, stante il modello di esercizio previsto, si evince che per la tratta Ponte S.Pietro-Bergamo la condizione di possibile disturbo sugli edifici viene raggiunta ad una distanza di circa 10 m dall'asse della linea ferroviaria per il periodo diurno mentre ad una distanza inferiore nel periodo notturno.

Come detto tra le progressive 0+000 e 1+100 dove la linea ferroviaria è in affiancamento a quella di Treviglio Ovest – Bergamo, sono stati considerati i livelli di vibrazione indotti dal traffico ferroviario dati dalla sovrapposizione dell'esercizio delle due linee in affiancamento. Se per il periodo notturno permane la condizione di non criticità con il raggiungimento di livelli vibrazionali immessi sui ricettori residenziali inferiori al valore di riferimento di 74 dB, per il periodo diurno il valore soglia dei 77 dB viene raggiunto ad una distanza di circa 15 metri dall'asse della linea ferroviaria. Dall'analisi planimetrica dei ricettori all'interno dell'ambito di studio considerato per lo studio acustico, la condizione di possibile disturbo sui ricettori residenziali è riscontrata per quelli posti tra le progressive pk 0+900 e 1+000, ovvero gli edifici a destinazione residenziale 2422, 2425 e 2427.

Per quanto riguarda invece la tratta tra Bergamo e Montello, dall'analisi previsionale dei livelli di vibrazione si evince che il valore soglia dei 77 dB riferiti ai ricettori residenziali nel periodo diurno viene raggiunto ad una distanza dall'asse della linea ferroviaria di circa 14 m. Dall'analisi planimetrica dei ricettori all'interno dell'ambito di studio considerato per lo studio acustico, la condizione di possibile disturbo sui ricettori residenziali è riscontrata per quelli posti tra le seguenti progressive pk 2+100 e 2+200, ovvero gli edifici a destinazione residenziale 1340a e 1340b.

| | | | | | | |
|---|---|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELLLO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo | | | | | |
| | PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A | FOGLIO 22 di 23 |

6 CONCLUSIONI

Il presente studio è finalizzato alla verifica delle condizioni di esposizione alle vibrazioni indotte dall'esercizio della ferroviaria sui ricettori contermini l'opera di 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 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo".

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 dei valori misurati in corrispondenza di due punti. Ciascun punto di misura è costituito da tre vibrometri, in grado di rilevare i livelli di accelerazione lungo i tre assi X, Y e Z, posti ad una distanza di 10, 20 e 30 metri dall'asse del binario dell'attuale linea ferroviaria. Dai livelli di accelerazione rilevati sono stati determinati i valori medi riferiti ad un singolo transito di un convoglio ferroviario. Sulla scorta del modello di esercizio futuro sono stati determinati successivamente i livelli di accelerazione previsionali in corrispondenza delle tre postazioni T1, T2 e T3 opportunamente corretti in funzione della velocità di transito di progetto. Le analisi sono state sviluppate per entrambe le tratte di progetto e considerando anche la presenza della line Treviglio Ovest – Bergamo parzialmente in affiancamento alla tratta Ponte S.Pietro-Bergamo tra le progressive pk 0+000 e 1+100.

Facendo riferimento a quanto indicato dalla norma UNI 9614 che individua per gli edifici a destinazione abitativa un valore di riferimento pari a 77 dB nel periodo diurno e 74 dB in quello notturno, attraverso la legge di propagazione è stata determinata la distanza dall'asse della linea ferroviaria alla quale i valori soglia vengono raggiunti. Se per il periodo notturno non si evincono condizioni di criticità in ragione dell'entità dei flussi di traffico previsti dal modello di esercizio di progetto e la localizzazione dei ricettori prossimi alla linea ferroviaria, per il periodo diurno si riscontrano alcune criticità in corrispondenza delle progressive distinte per tratta riportate nella tabella seguente.

| Tratta | Progressive | Lunghezza [m] | Ricettori |
|------------------------|-------------|---------------|-------------------|
| Ponte S.Pietro-Bergamo | 0+900-1+000 | 100 m | 2422, 2425 e 2427 |
| Bergamo-Montello | 2+100-2+200 | 100 m | 1340° e 1340b |

Tabella 6-1 Localizzazione delle tratte critiche che richiedono interventi per la riduzione delle emissioni vibrazionali

Al fine di eliminare/ridurre le criticità che si presentano lungo il tracciato, possono essere previsti alcuni interventi di mitigazione. È da premettere che il primario sistema di riduzione delle vibrazioni

| | | | | | | |
|---|--|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | RADDOPPIO PONTE S.PIETRO-BERGAMO-MONTELLO Lotto 2: PRG Ponte San Pietro e Raddoppio della Linea da Curno a Bergamo | | | | | |
| | PROGETTO DEFINITIVO STUDIO VIBRAZIONALE | | | | | |
| STUDIO VIBRAZIONALE Relazione | COMMESSA NB1R | LOTTO 02 D 22 | CODIFICA RG | DOCUMENTO IM0004 002 | REV. A | FOGLIO 23 di 23 |

è la manutenzione delle ruote dei veicoli ferroviari e dei binari. Infatti i problemi legati alle corrugazioni delle ruote o delle rotaie inducono incrementi notevoli sulla vibrazione emessa, comportando un annullamento dei benefici indotti dai sistemi di mitigazione.

In linea generale gli interventi di mitigazione adottabili possono essere suddivisi in due categorie:

- interventi di tipo attivo
- interventi di tipo passivo

Le soluzioni di tipo attivo consistono in interventi sul corpo o sull'armamento ferroviario mirati a ridurre le emissioni vibranti alla sorgente. Per quanto riguarda gli interventi sull'armamento ferroviario è possibile realizzare platee di tipo flottante, in alternativa alla soluzione convenzionale di armamento, realizzato con traverse in cap posate su massiciata ferroviaria (Armamento convenzionale su ballast).

Questa soluzione può essere realizzata inserendo tra il piano di posa del ballast e il ballast stesso un materassino elastomerico (sistemi a ballast flottante), oppure utilizzando manufatti flottanti in calcestruzzo armato (prefabbricati o gettati in opera) dotati di sospensioni in gomma (materassini o piastre elastomeriche sagomate). Tali metodiche di mitigazione risultano idonee per i tratti in galleria.

Nei tratti a cielo aperto infatti, l'adozione di armamento di tipo flottante, richiederebbe complesse verifiche necessarie affinché sia assicurata la sicurezza del transito del treno, la durabilità e la manutenzione del corpo ferroviario e dell'armamento stesso.

Gli interventi di tipo passivo mirano a ridurre la dose di vibrazione al recettore interponendo degli "ostacoli" alla propagazione della vibrazione nel percorso tra linea ferroviaria e recettore. In particolare si segnala un sistema consistente nel realizzare, parallelamente alla linea ferroviaria, dei diaframmi nel terreno. Il controllo delle vibrazioni mediante diaframmi è analogo al controllo della rumorosità mediante barriere antirumore.

Per la redazione esecutiva del diaframma (altezza, larghezza, riempimento, posizionamento, etc) è necessario conoscere nel dettaglio la distribuzione spettrale della vibrazione indotta dal convoglio ferroviario nei principali ambienti dell'edificio impattato.

Tale informazioni saranno acquisite nelle misure post operam che, oltre ad una funzione di controllo, assumeranno anche una funzione progettuale. Infatti nel caso di effettiva criticità del recettore forniranno gli elementi idonei alla progettazione mirata dell'intervento di mitigazione.