

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O. ARCHITETTURA, AMBIENTE E TERRITORIO

PROGETTO DEFINITIVO

NODO DI TORINO

**COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO
PORTA NUOVA**

STUDIO VIBRAZIONALE

Relazione generale

SCALA:

-

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

NT0P 00 D 22 RG IM0004 002 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Definitiva	C. Giannobile 	Giugno 2019	A. Corvaja A. Ventimiglia 	Giugno 2019	G. De Michele 	Giugno 2019	D. Ludovici Giugno 2019

File: NT0P00D22RGIM0004002A

n. Elab.:

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	NT0P	00 D 22	RG	IM0004 002	A	1 di 39

Indice

1	PREMESSA.....	2
2	RIFERIMENTI NORMATIVI	4
2.1	IL QUADRO DELLE NORME DI RIFERIMENTO.....	4
2.2	LIMITI APPLICABILI NELL'AMBITO DEL PRESENTE STUDIO.....	8
3	AREA DI STUDIO.....	10
3.1	INQUADRAMENTO TERRITORIALE	10
3.2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	11
4	INDAGINI VIBRAZIONALI	14
4.1	RILIEVI DI VIBRAZIONI IN SITU.....	14
4.2	METODOLOGIA DI ANALISI DEI DATI RILEVATI	17
4.3	SINTESI DEI DATI RILEVATI.....	19
5	MODELLO PREVISIONALE.....	23
5.1	LE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO	23
5.2	CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE DI VIBRAZIONI	26
5.2.1	Interazione ruota-rotaia	26
5.2.2	Velocità dei treni.....	28
5.3	LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO	29
5.3.1	La propagazione delle onde vibrazionali.....	29
5.3.2	La determinazione della funzione di trasferimento.....	31
6	LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO	36
6.1	PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO	36
6.2	INDIVIDUAZIONE DELLE POTENZIALI AREE CRITICHE.....	37
7	CONCLUSIONI.....	38

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

1 PREMESSA

La costruzione e l'esercizio di una linea ferroviaria sono fonte di sollecitazioni dinamiche nel terreno circostante caratterizzate da una modesta fascia di influenza, in genere inferiore ai 50 m. In questa fascia le vibrazioni possono generare disturbo alla popolazione residente o a determinate attività umane, ma risulta estremamente improbabile che esse possano causare effettivi danni alle strutture. Il disturbo alle persone, definito in letteratura come annoyance, dipende dall'intensità e frequenza dell'evento disturbante e dal tipo di attività svolta. L'annoyance deriva dalla combinazione di effetti che coinvolgono la percezione uditiva e la percezione tattile delle vibrazioni. Gli effetti sulle persone sono estesi all'intero corpo e possono essere ricondotti genericamente ad un aumento dello stress, con conseguente attivazione di ripetute reazioni di orientamento e di adattamento, e con eventuale insorgenza o aggravamento di malattie ipertensive.

Le vibrazioni possono in alcune situazioni, od in presenza di caratteristiche di estrema suscettività strutturale o di elevati/prolungati livelli di sollecitazione dinamica, causare danni agli edifici. 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.

Per la valutazione delle soglie di accettabilità relative a tali effetti sono state elaborate norme tecniche nazionali (UNI) e internazionali (ISO), le quali, pur non avendo validità di legge, forniscono un riferimento per la valutazione dei fenomeni vibratorii.

Il presente rapporto contiene i risultati dello studio relativo all'impatto vibrazionale prodotto dalla realizzazione del progetto di completamento della linea diretta Torino Porta Susa – Porta Nuovo del Nodo di Torino.

L'iter metodologico seguito può essere schematizzato secondo le fasi di lavoro di seguito riportate:

- Analisi della normativa applicabile e individuazione dei valori di riferimento.

Analisi delle norme applicabili su base sia nazionale che internazionale e individuazione della metodologia e valori assunti come riferimento.

- Caratterizzazione ante operam.

Individuazione dei potenziali ricettori sensibili attraverso una indagine sul campo di censimento dei ricettori. Quale area di studio si è considerata una fascia di 50 metri per lato lungo l'intero sviluppo della linea di progetto.

- Rilevamento delle vibrazioni

Le indagini sperimentali sono state eseguite in corrispondenza delle linee attualmente in esercizio lungo sezioni tipologiche rappresentative di quelle di progetto. Le misure sono state finalizzate, oltre che alla valutazione dell'entità del livello vibrazionale allo stato attuale indotto

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NTOP	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

dal transito dei convogli ferroviari, anche alla costruzione di un modello sperimentale in relazione alle caratteristiche del terreno e delle opere in galleria.

- Individuazione delle aree critiche

Sulla base del modello sperimentale individuato sono stati individuate le aree dove vi sono da attendersi dei superamenti dei valori di riferimento.

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSAS – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

2 RIFERIMENTI NORMATIVI

2.1 IL QUADRO DELLE NORME DI RIFERIMENTO

Benché le vibrazioni trasmesse agli edifici non siano mai state argomento di legiferazione da parte dello Stato Italiano è tuttavia universalmente riconosciuta la competenza in materia da parte dell'UNI – Milano, ente preposto alla redazione della normativa tecnica in ambito nazionale. L'UNI ha pubblicato negli anni una completa serie di norme (nazionali e/o recepimenti di norme internazionali) che coprono l'intera problematica delle vibrazioni negli edifici: la valutazione del disturbo alle persone, la valutazione del danno strutturale, l'implementazione della metodologia di misura ecc.. In particolare, la norma di interesse per il presente studio di impatto vibrazionale è la UNI 9614:2017 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo". Tale norma definisce il metodo di misura delle vibrazioni di origine ferrotranviaria immesse negli edifici ad opera di sorgenti esterne o interne agli edifici stessi. La norma concorda parzialmente con la norma internazionale ISO 2631/2.

La norma UNI 9916:2004 fornisce una guida per la scelta di appropriati metodi di misura, di trattamento dei dati e di valutazione dei fenomeni vibratorii per permettere la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica.

Vi sono poi norme internazionali di riferimento, fra cui:

- ISO 8041 Human response to vibration – Measuring instrumentation
- ISO 2631-1, Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General requirements, 1997;
- ISO 2631-2, Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz), 1989;
- ISO 5347, Metodi per la calibrazione dei rilevatori di vibrazioni;
- ISO 5348, Montaggio meccanico degli accelerometri;
- ISO 1683, Acoustics – Preferred reference quantities for acoustic levels, 1983;
- DIN 4150, Vibrations in building. Part 1: Principles, predetermination and measurement of the amplitude of oscillations, 1975.
- DIN 4150-2, Vibrations in building. Part 2: Influence on persons in buildings, 1975.
- DIN 4150-3, Vibrations in building. Part 3: Influence on constructions, 1975.

Non si possono infine trascurare alcune norme e linee guida particolarmente importanti per le valutazioni dell'impatto da **vibrazioni in ambito ferroviario**, fra cui:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSAS – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

- ISO 14837-1 Mechanical vibration--Ground-borne noise and vibration arising from rail Systems - Part1: General guidance
- ISO 10811-1 (2000) Mechanical vibration and shock -- Vibration and shock in buildings with sensitive equipment -- Part 1: Measurement and evaluation
- ISO 10811-2 (2000) Mechanical vibration and shock -- Vibration and shock in buildings with sensitive equipment -- Part 2: Classification
- ISO 4866 (1990) Mechanical vibration and shock -- Vibration of fixed structures -- Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures
- Report FTA-VA-90-1003-06 Transit Noise and Vibration Impact Assessment (Office of Planning and Environment Federal Transit Administration – USA)
- SS 460 48 61 (Swedish standard): Vibration och stöt – Mätning och riktvärden för bedömning av komfort i byggnader
- NS 8176 (Norwegian Standard): Vibration and shock Measurement of vibration in buildings from landbased transport and guidance to evaluation of its effects on human beings (Vibrasjoner og støt – Måling i bygninger av vibrasjoner fra landbasert samferdsel og veiledning for bedømmelse av virkning på mennesker)
- Norwegian standard NS 8141 (NSF, 2001)
- Swedish standard SS 460 48 66 (SEK, 1991)

Di seguito si fornisce una breve sintesi dei contenuti essenziali delle norme più rilevanti utilizzate per la valutazione dell'impatto da vibrazioni.

UNI 9614:2017 "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 delle vibrazioni immesse nell'edificio dalla specifica sorgente oggetto di indagine (V_{sor}), quale valore pari al 95esimo percentile della distribuzione cumulata di probabilità della massima accelerazione ponderata $a_{w,max}$ misurata sui singoli eventi. Tale valore viene confrontato con una serie di limiti individuati per gli edifici a seconda della destinazione d'uso e dal periodo temporale di riferimento (diurno 6:00-22:00, notturno 22:00-6:00).

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

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSÀ – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Luogo	Accelerazione [m/s ²]
Abitazioni (notte)	3.6.0*10 ⁻³
Abitazioni (giorno)	7.2*10 ⁻³
Luoghi lavorativi	14.4*10 ⁻³
Ospedali, case di cura, ecc..	2*10 ⁻³
Asili e case di riposo	3.6*10 ⁻³
Scuole	5.4*10 ⁻³

Tabella 2-1 Valori di soglia di vibrazione relativi al disturbo alle persone (UNI 9614:2017)

Le misure devono essere eseguite in conformità alla suddetta norma tecnica. In particolare, la durata complessiva è legata al numero di eventi del fenomeno in esame necessaria ad assicurare una ragionevole accuratezza statistica, tenendo conto non solo della variabilità della sorgente ma anche dell'ambiente di misura. Nel caso di infrastrutture ferroviarie, il singolo evento è costituito dal passaggio dell'intero singolo convoglio sul binario, che, quando esistano più binari paralleli, dà luogo ad accelerazioni ponderate più elevate. Il numero minimo di eventi da considerare è 15 (appendice A2: vibrazioni prodotte da traffico ferrotramviario).

UNI 9916:2004 "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 semplificata per la classificazione degli edifici secondo la loro probabile reazione alle vibrazioni

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSAS – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

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).

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSÀ – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 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÷50 mm/s, e per vibrazioni continue, con velocità 2÷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÷100 mm/s oppure per vibrazioni continue associate a velocità di 3÷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÷200 mm/s oppure per vibrazioni continue associate a velocità di 5÷20 mm/s.

2.2 LIMITI APPLICABILI NELL'AMBITO DEL PRESENTE STUDIO

Ai fini del presente studio vibrazionale, finalizzato alla valutazione delle immissioni di vibrazioni indotte dal transito dei convogli ferroviari lungo la linea di progetto e alla stima dell'interferenza sui

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE					
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	
NT0P	00 D 22	RG	IM0004 002	A	9 di 39	

potenziali ricettori all'interno della fascia di studio considerata, sono stati considerati i seguenti criteri e quindi i seguenti valori limite assunti come riferimento.

Tipologia immissione	Criterio di valutazione / norma di riferimento	Parametro di valutazione	Limiti applicabili
Vibrazioni da esercizio linea ferroviaria – disturbo alle persone	UNI 9614:2017	V _{sr}	Ambienti ad uso abitativo: 7,2 mm/s ² (periodo diurno), 3,6 mm/s ² (periodo notturno), 5,4 mm/s ² (periodo diurno di giornate festive) Luoghi lavorativi: 14 mm/s ² Ospedali, case di cura ed affini: 2 mm/s ² Asili e case di riposo: 3,6 mm/s ² Scuole: 5,4 mm/s ²

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NTOP	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

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

Si tratta di un'area compresa nel territorio della città di Torino che si sviluppa lungo l'intera linea attuale tra Porta Susa e Porta Nuova su un territorio morfologicamente pianeggiante.

I ricettori sono costituiti da tutti gli edifici, prevalentemente residenziali e multipiano, di solito tra i cinque ed i dieci piani di altezza, localizzati lungo il tratto di linea ferroviaria oggetto di studio.

Allo scopo di valutare correttamente l'impatto si è calcolata la distanza reale dei ricettori potenzialmente influenzati tenendo conto della effettiva distanza del ricettore dalla galleria, che è

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSÀ – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE					
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	
NT0P	00 D 22	RG	IM0004 002	A	11 di 39	

funzione non solo della distanza intesa come proiezione orizzontale dalla galleria, ma anche della altimetria del sito.

3.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'area di studio si estende in corrispondenza di un'unità fluvio-glaciale di età pleistocenica costituente il conoide del F. Dora Riparia e strutturalmente in rapporto con il sistema delle cerchie glaciali intermedie dell'Anfiteatro Morenico di Rivoli-Avigliana. Tale unità, come rappresentato nello stralcio della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 foglio 155 "Torino ovest" di Figura 2, prende il nome di Subsistema di Col Gianesco.

Il limite basale del Subsistema di Col Gianesco è con i più antichi depositi, anch'essi fluvio-glaciali, del Subsistema di Cresta Grande affioranti nel settore Est del tratto di studio e a loro volta sovrapposti, con contatto erosivo, sui depositi continentali di età plio-pleistocenici della facies "Villafranchiana". I sedimenti della successione Villafranchiana, che nella cartografia ufficiale è stata rinominata "Unità di La Cassa", non affiorano nell'area in esame ma risultano coperti dai depositi glaciali e fluvio-glaciali quaternari.

Globalmente, nel territorio di Grugliasco e della periferia ovest di Torino, i depositi di natura fluvio-glaciale hanno spessori dell'ordine di 50÷80 metri e sono caratterizzati da ghiaie ciottolose, più o meno sabbiose, con locali intercalazioni di lenti e livelli di limitata estensione laterale di sabbie e sabbie ghiaiose. Alla sommità dell'unità è presente quasi ovunque una coltre di spessore da decimetrico a metrico (spessore massimo circa 3 metri) di sedimenti fini, limosi, argillificati e pedogenizzati, riconducibili ad apporti fluviali a bassa energia ed a depositi di natura eolica (loess e loess rimaneggiato).

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A



SINTEMA DI FRASSINERE

Subsistema di Col Gianeseco



AFR₂

Sabbie ghiaiose e ghiaie sabbiose con clasti eterometrici di quarziti, serpentiniti, gneiss e subordinatamente di prasiniti, calcescisti e marmi grigi (depositi fluvioglaciali) (AFR_{2b}). Sottile copertura di silt sabbiosi e *loess l.s.* e locali accumuli di sabbie grossolane (depositi eolici) (AFR_{2d}). Sabbie siltose e silt sabbiosi stratificati con intercalazioni ghiaiose e torbose (depositi lacustri, palustri e di torbiera) (AFR_{2e}). Morenico scheletrico sparso (AFR_{2c3}). *Diamicton* con clasti e blocchi angolosi e subangolosi, sfaccettati, levigati e striati, immersi in una matrice siltoso-sabbiosa addensata (depositi glaciali di fondo) (AFR_{2d4}). *Diamicton* con clasti angolosi e subangolosi e blocchi di dimensioni metriche immersi in una matrice siltoso-sabbiosa (depositi glaciali di ablazione) (AFR_{2e5}). I depositi sono complessivamente poco alterati (10-7,5YR). *Parte superiore del PLEISTOCENE SUP.*

Subsistema di Cresta Grande



AFR₁

Sabbie ghiaiose e ghiaie sabbiose grossolane con matrice siltoso-sabbiosa e con copertura di silt sabbiosi e *loess l.s.* con spessore di 0,5-2 m (depositi fluvioglaciali) (AFR_{1b}). Silt sabbiosi con locali intercalazioni torbose (depositi lacustri, palustri e di torbiera) (AFR_{1d}). Depositi glaciali indifferenziati (AFR_{1c1}). Morenico scheletrico sparso (AFR_{1c3}). *Diamicton* con clasti e blocchi angolosi e subangolosi, sfaccettati, levigati e striati, immersi in una matrice siltoso-sabbiosa e siltoso-argillosa addensata (depositi glaciali di fondo) (AFR_{1c4}). *Diamicton* con clasti angolosi e subangolosi e blocchi di dimensioni superiori a un metro (depositi glaciali di ablazione) (AFR_{1e5}). Con esclusione dei soli sedimenti lacustri, i depositi sono complessivamente poco alterati (10-7,5YR). *Parte inferiore del PLEISTOCENE SUP.*

Figura 3-2 Stralcio della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 – Progetto CARG. Foglio n. 155 “Torino ovest” (non in scala).

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE					
COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A	FOGLIO 13 di 39	

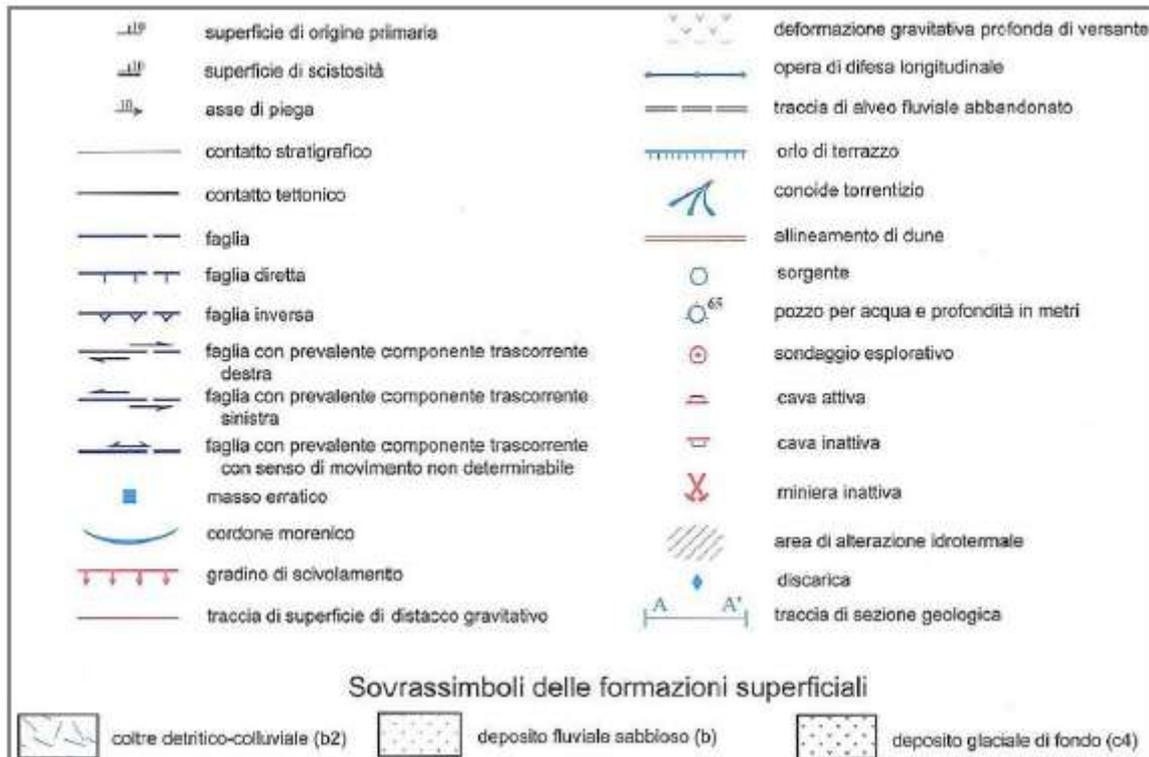


Figura 3-3 Legenda della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 – Progetto CARG. Foglio n. 155 “Torino ovest” (non in scala).

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSAS – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

4 INDAGINI VIBRAZIONALI

4.1 RILIEVI DI VIBRAZIONI IN SITU

E' stata eseguita una campagna di rilievi vibrometrici in corrispondenza di due sezioni lungo le attuali linee ferroviarie del nodo di Torino. Tale attività è finalizzata alla caratterizzazione della propagazione delle vibrazioni ferroviarie in una condizione analoga a quella prevista per il progetto oggetto di studio essendo analoghe le condizioni al contorno, ovvero:

- Contesto geologico di riferimento;
- Tipologia dei convogli ferroviari;
- Opere civili ferroviarie in galleria.

Come detto le indagini sono state eseguite in due differenti sezioni. Ciascuna sezione è costituita da tre terne di accelerometri posizionati in corrispondenza della linea ferroviaria per un periodo di misura limitato e rappresentativo per la caratterizzazione della sorgente ferrotranviaria. Stante la poca disponibilità di aree disponibili per l'installazione della strumentazione di misura, le misure sono state concentrate in corrispondenza del quadrivio Zappata, ovvero:

- Sezione 1 (VIB.01): in corrispondenza della linea Porta Nuova – Porta Susa tra largo Turati e il quadrivio Zappata all'interno dell'area verde "Giardini Cesare Valperga di Masino";
- Sezione 2 (VIB.02): in corrispondenza della linea Torino – Modane tra il quadrivio Zappata e Largo Orbassano all'interno dell'area verde "Giardini della Clessidra"

Ciascuna misura 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. Per ciascuna misura sono state eseguiti due campionamenti di due ore ciascuno per un totale periodo di osservazione utile per la caratterizzazione delle sorgenti ferroviarie di quattro ore. Durante tale arco temporale sono stati rilevati per la sezione 1 un numero totale di 52 transiti (traffici A/V, Regionale e Intercity) e per la sezione 2 un numero totale di 24 transiti (traffici Regionale, Lunga Percorrenza e Mercè).

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSAS – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE					
COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A	FOGLIO 15 di 39	



Figura 4-1 Localizzazione dei punti di misura

Le misure sono state eseguite secondo le modalità indicate dalla norma UNI 9614:2017. I vibrometri sono stati posizionati sul terreno in corrispondenza dell'asse ferroviario così come indicato nelle figure schematiche seguenti.

Non potendo installare la strumentazione in corrispondenza del piano del ferro, i tre accelerometri sono stati posizionati sul terreno al piano campagna in modo da verificare:

- Le condizioni di propagazione rispetto l'asse della linea ferroviaria nelle due direzioni laterali (terne T1 e T2);
- La propagazione delle vibrazioni nel terreno (terne T2 e T3).

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A



Sezione 1

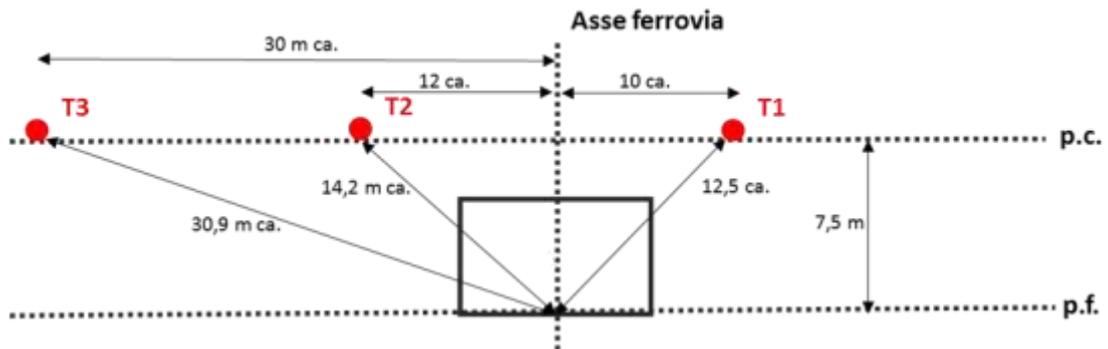


Figura 4-2 Rilievi in situ: sezione VIB.01, localizzazione dei punti di monitoraggio delle vibrazioni rispetto al piano campagna e piano del ferro

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSAS – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE					
COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A	FOGLIO 17 di 39	



Sezione 2

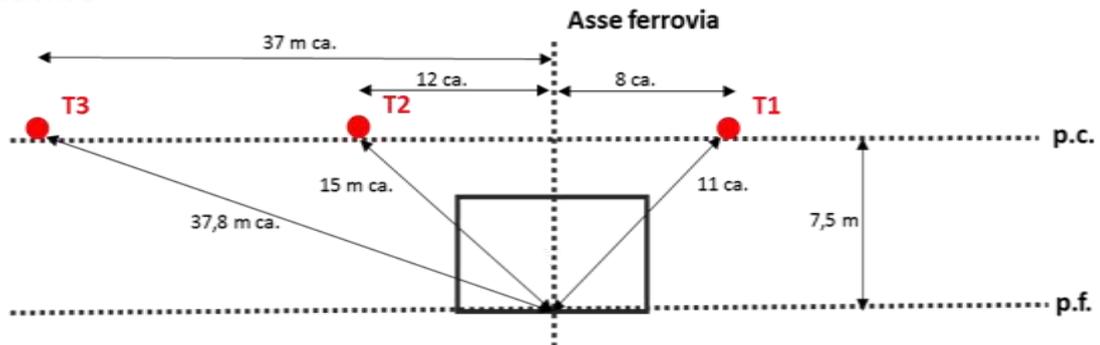


Figura 4-3 Rilievi in situ: sezione VIB.02, localizzazione dei punti di monitoraggio delle vibrazioni rispetto al piano campagna e piano del ferro

4.2 METODOLOGIA DI ANALISI DEI DATI RILEVATI

Il metodo di analisi ed elaborazione utilizzato per la determinazione dei parametri di riferimento per la valutazione del disturbo è quello indicato dalla normativa UNI 9614:2017. L'elaborazione del segnale corrispondente ad ogni singolo evento prevede pertanto i seguenti passaggi:

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

- **Filtraggio con filtro passa banda e con filtro di ponderazione Wm**

I valori rilevati dal singolo strumento vengono filtrati con un filtro passa banda, con caratteristiche conformi a quelle indicate dalla norma UNI 9614:2017, e successivamente con il filtro di ponderazione Wm.

- **Calcolo del valore efficace della accelerazione assiale ponderata**

Per l'intera storia temporale del segnale ponderato viene calcolato l'andamento del tempo del valore efficace dell'accelerazione ponderata per ogni singolo asse cartesiano. Il tempo di integrazione è pari ad 1 secondo.

- **Calcolo dell'accelerazione ponderata totale efficace $a_w(t)$**

Il calcolo dell'accelerazione ponderata totale efficace $a_w(t)$ viene eseguito istante per istante come combinazione a partire dalle tre accelerazioni assiali ponderate mediante l'equazione indicata dalla UNI 9614:2018 (par. 8.3).

- **Individuazione degli eventi di origine ferroviaria**

A partire dai dati di traffico rilevati nel periodo di misura sono stati individuati gli eventi di origine ferroviaria e l'andamento temporale della $a_w(t)$ in un periodo rappresentativo del transito del convoglio (sono stati considerati i 10 secondi antecedenti e successivi il valore di picco).

- **Calcolo della accelerazione massima ponderata $a_{w,max,j}$ e della massima accelerazione statistica $a_{w,95}$**

Tali valori sono stati calcolati secondo le modalità indicate ai paragrafi 8.4 e 8.5 della UNI 9614:2017. Tale valore è stato utilizzato per la determinazione della V_{imm} , ovvero della accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni immesse.

- **Calcolo della accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni residue Vres**

Dall'andamento della $a_w(t)$ nell'intero periodo di misura, una volta estratti i valori rappresentativi dell'evento ferroviario, è stato determinato il contributo emissivo vibrazionale associato alle altre sorgenti caratterizzanti il sito di misura. Da tale analisi è stato calcolato il valore statistico delle vibrazioni presenti in assenza della sorgente ferroviaria.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

- **Calcolo della accelerazione ponderata massima statistica della sorgente V_{sor}**

Dai valori precedentemente calcolati della V_{imm} e V_{res}, si calcola il valore dell'accelerazione associata alla sorgente ferroviaria che nelle successive fasi di studio viene confrontato con i valori limite di riferimento indicati dalla norma UNI 9614:2017 per ciascun edificio secondo la destinazione d'uso.

4.3 SINTESI DEI DATI RILEVATI

Rimandando ai report delle indagini NT0P00D22RHIM0004001A, di seguito si riporta la sintesi dei valori ottenuti per ciascun transito nelle tre terne di ciascuna sezione e i valori complessivi della V_{imm}, V_{res} e V_{sor}.

SEZIONE 1						
Evento	Cat.	Data	Orario	a_w MAX TERNA 1 [mm/s²]	a_w MAX TERNA 2 [mm/s²]	a_w MAX TERNA 3 [mm/s²]
1	REG	08/05/2019	11:46:12:000	11,9	11,3	4,7
2	REG	08/05/2019	11:48:17:000	5,5	5,2	9,0
3	Alta velocità	08/05/2019	11:53:45:000	10,3	10,2	7,6
4	Alta velocità	08/05/2019	11:54:10:000	10,8	6,8	4,6
5	REG	08/05/2019	12:00:30:000	13,4	12,4	9,4
6	REG	08/05/2019	12:01:13:000	10,7	12,8	7,3
7	Alta velocità	08/05/2019	12:08:07:000	10,7	9,9	8,5
8	REG	08/05/2019	12:11:23:000	10,3	9,9	4,9
9	REG	08/05/2019	12:19:50:000	7,2	6,6	3,7
10	Alta velocità	08/05/2019	12:27:16:000	10,0	9,5	5,9
11	Alta velocità	08/05/2019	12:28:51:000	4,5	4,3	2,2
12	IC	08/05/2019	12:30:27:000	17,5	16,3	7,9
13	IC	08/05/2019	12:33:53:000	14,8	14,0	7,7
14	Alta velocità	08/05/2019	12:42:48:000	12,7	11,7	10,4
15	IC	08/05/2019	12:46:17:000	27,8	25,7	9,2
16	REG	08/05/2019	12:49:07:000	10,0	9,6	3,8
17	REG	08/05/2019	12:50:27:000	5,8	5,4	2,8
18	IC	08/05/2019	12:58:28:000	15,2	14,4	8,4
19	Alta velocità	08/05/2019	13:05:21:000	8,9	16,8	13,9

SEZIONE 1						
Evento	Cat.	Data	Orario	a_w MAX TERNA 1 [mm/s²]	a_w MAX TERNA 2 [mm/s²]	a_w MAX TERNA 3 [mm/s²]
20	REG	08/05/2019	13:09:25:000	17,6	16,2	9,4
21	IC	08/05/2019	13:18:13:000	27,7	26,0	14,9
22	Alta velocità	08/05/2019	13:23:04:000	4,4	12,6	10,4
23	Alta velocità	08/05/2019	13:28:21:000	7,3	6,8	5,9
24	Alta velocità	08/05/2019	13:30:30:000	11,4	10,4	6,3
25	REG	08/05/2019	13:33:30:000	22,5	21,1	10,5
26	IC	08/05/2019	13:38:44:000	13,0	12,4	9,4
27	Alta velocità	08/05/2019	13:39:29:000	15,6	14,6	8,3
28	REG	08/05/2019	13:42:49:000	20,9	19,4	10,5
29	Alta velocità	09/05/2019	09:31:54:000	16,2	15,6	6,4
30	REG	09/05/2019	09:32:30:000	6,7	6,2	1,2
31	REG	09/05/2019	09:38:28:000	21,8	20,6	3,0
32	REG	09/05/2019	09:47:55:000	24,2	22,5	3,6
33	REG	09/05/2019	09:48:49:000	26,5	24,6	4,9
34	Alta velocità	09/05/2019	09:53:53:000	14,9	14,2	2,3
35	Alta velocità	09/05/2019	09:58:01:000	19,2	17,7	4,4
36	Alta velocità	09/05/2019	10:03:35:000	18,9	17,7	3,3
37	REG	09/05/2019	10:07:27:000	35,9	33,6	6,9
38	REG	09/05/2019	10:11:09:000	39,6	24,3	5,7
39	IC	09/05/2019	10:11:51:000	12,4	11,6	3,1
40	REG	09/05/2019	10:18:52:000	19,6	18,5	2,8
41	Alta velocità	09/05/2019	10:25:51:000	12,9	17,1	3,0
42	Alta velocità	09/05/2019	10:27:11:000	9,4	8,6	1,7
43	Alta velocità	09/05/2019	10:30:38:000	19,7	18,2	3,6
44	Alta velocità	09/05/2019	10:35:37:000	11,3	10,7	2,5
45	REG	09/05/2019	10:35:59:000	8,5	8,1	1,7
46	REG	09/05/2019	10:39:55:000	27,1	24,7	3,7
47	Alta velocità	09/05/2019	10:46:20:000	20,0	18,8	3,7
48	IC	09/05/2019	10:50:23:000	24,0	22,0	6,9
49	REG	09/05/2019	10:58:10:000	22,3	20,6	6,8
50	IC	09/05/2019	11:07:47:000	16,5	17,3	3,7
51	REG	09/05/2019	11:12:09:000	13,7	12,8	5,4
52	IC	09/05/2019	11:15:36:000	32,0	30,2	3,9
53	REG	09/05/2019	11:18:57:000	26,9	25,1	4,2

Tabella 4-1 Rilievi in situ: sezione VIB.01, valori della massima accelerazione ponderata in mm/s² in corrispondenza delle tre terne T1, T2 e T3 della sezione calcolate per ciascun transito ferroviario

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSAS – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

SEZIONE 2						
Evento	Cat.	Data	Orario	a_w MAX TERNA 1 [mm/s²]	a_w MAX TERNA 2 [mm/s²]	a_w MAX TERNA 3 [mm/s²]
1	IC	08/05/2019	16:03:19	24,6	22,8	16,1
2	Merci	08/05/2019	16:07:01	11,5	11,0	8,6
3	REG	08/05/2019	16:15:03	14,4	13,3	13,2
4	REG	08/05/2019	16:20:43	18,2	16,9	14,5
5	Merci	08/05/2019	16:23:24	32,6	30,1	8,8
6	REG	08/05/2019	16:44:57	20,6	19,3	15,9
7	Merci	08/05/2019	16:49:11	15,2	14,5	10,4
8	IC	08/05/2019	16:52:46	24,9	23,0	17,5
9	IC	08/05/2019	17:14:53	16,6	15,6	7,9
10	REG	08/05/2019	17:19:48	24,3	22,5	17,0
11	REG	08/05/2019	17:33:57	25,3	24,3	18,1
12	REG	08/05/2019	17:40:40	24,3	22,7	19,5
13	REG	08/05/2019	17:51:14	21,2	19,6	14,2
14	REG	09/05/2019	12:14:14	14,8	13,6	19,4
15	LIS	09/05/2019	12:16:43	2,3	2,2	3,3
16	Merci	09/05/2019	12:17:05	22,2	20,8	28,1
17	IC	09/05/2019	12:20:17	24,9	23,2	42,2
18	Merci	09/05/2019	12:24:02	33,6	32,5	28,8
19	REG	09/05/2019	12:37:27	14,6	13,5	18,9
20	IC	09/05/2019	12:50:01	28,3	26,8	37,4
21	REG	09/05/2019	13:08:18	18,4	17,3	22,9
22	REG	09/05/2019	13:19:25	15,3	14,1	19,8
23	IC	09/05/2019	13:43:38	19,1	18,1	34,4
24	REG	09/05/2019	13:52:54	24,5	22,8	36,7

Tabella 4-2 Rilievi in situ: sezione VIB.02, valori della massima accelerazione ponderata in mm/s² in corrispondenza delle tre terne T1, T2 e T3 della sezione calcolate per ciascun transito ferroviario

Per quanto concerne la sezione 2, è stata riscontrata una anomalia del segnale e quindi dei valori misura nel secondo periodo di campionamento (valori sulla terna T3 più elevati rispetto a quelli delle terne T1 e T2 in corrispondenza del transito del convoglio), pertanto i valori ottenuti per i transiti appartenenti al gruppo 14-24 sono stati esclusi dal calcolo delle accelerazioni ponderate massime statistiche.

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Ne consegue che per ciascuna terna, i valori delle V_{res} , V_{imm} e V_{sor} risultano essere i seguenti.

	Sezione 1 – punto VIB.01			Sezione 2 – punto VIB.02		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
V_{imm} [mm/s²]	30,7	27,5	11,6	31,4	29,2	21,0
V_{res} [mm/s²]	18,3	10,4	8,5	12,7	12,0	59,2
V_{sor} [mm/s²]	24,7	25,5	7,9	28,7	26,6	-

Tabella 4-3 Rilievi in situ: sintesi dei valori di accelerazione in mm/s² calcolati in corrispondenza delle terne T1, T2 e T3 nelle due sezioni di misura

Per quanto concerne la sezione 2, il valore delle accelerazioni ponderate residue risulta essere sensibilmente maggiore per effetto della presenza di altre sorgenti sul territorio non identificabili al momento della misura.

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

5 MODELLO PREVISIONALE

5.1 LE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO

I treni che si muovono su un percorso ferrato eccitano i binari e il relativo sottofondo su cui essi poggiano. 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 le vibrazioni incontrano un edificio possono essere percepite sia sotto forma di vibrazioni (vibrazioni trasmesse al corpo) sia sotto forma di rumore re-irradiato (di bassa frequenza). Le vibrazioni possono anche provocare danni strutturali o causare disturbo a macchine sensibili alle vibrazioni. Si è soliti considerare il problema dell'impatto da vibrazioni attraverso una analisi in tre fasi:

- Caratterizzazione della sorgente di vibrazioni;
- Caratterizzazione del percorso di propagazione;
- Caratterizzazione dei potenziali ricettori.

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). La vibrazione si propaga dalla struttura di supporto delle rotaie e raggiunge le pareti del tunnel; da qui si propaga attraverso il terreno sotto forma di onde elastiche. Benchè intercorra solo una piccola distanza, le onde che raggiungono le pareti del tunnel sono già state attenuate in modo consistente.

Le proprietà del suolo fanno sì che le pareti del tunnel possano vibrare in modo sensibilmente diverso: svariati autori (Ungar and Bender, 1975 and Kurzweil, 1979, NGI, 2004) hanno dimostrato che le vibrazioni di un tunnel scavato nella roccia sono inferiori di circa 5 dB (alle basse frequenze) e 12 dB (alle frequenze dell'udibile) alle vibrazioni di un tunnel scavato nella terra. Un recente studio norvegese ha inoltre dimostrato come le frequenze superiori a 160 Hz sono generalmente dovute al rumore prodotto dal passaggio del treno e non invece dalle vibrazioni della rotaia.

Le vibrazioni che si propagano all'esterno del tunnel nel suolo circostante assumono la forma di onde elastiche, che si propagano come onde di volume e come onde di superficie. Le onde di volume (body waves, che si propagano in uno spazio) sono costituite da onde longitudinali (onde di tipo P), che si propagano nella direzione parallela alla direzione di propagazione della vibrazione, e da onde trasversali (o di taglio) (shear waves, o onde di tipo S), che si propagano in direzione perpendicolare alla direzione di propagazione. Ungar and Bender (1975) dimostrarono come vi sia uno scarso

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSAS – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

accoppiamento modale (e dunque una elevata perdita di energia vibrazionale) fra il tunnel e il terreno circostante per le onde di tipo trasversale (shear waves), e dunque queste onde possono essere trascurate nella propagazione delle vibrazioni di un tunnel ferroviario.

Le onde di superficie (onde di Rayleigh, che si propagano appunto lungo una superficie) si dividono in onde orizzontali (onde di tipo R, o onde di Rayleigh) e onde verticali (onde di tipo L, o onde di Love). Queste onde hanno una propagazione di tipo ellittico che si sviluppa in un piano verticale attraverso la direzione di propagazione della vibrazione. Anche la parete del tunnel, la superficie del terreno e le fondazioni degli edifici costituiscono delle discontinuità che complicano il modello di propagazione ideale, che dunque diventa assai complesso.

Durante la propagazione dalla sorgente al ricevitore le onde vibratorie possono essere attenuate o amplificate secondo le modalità illustrate nel seguito. La modellazione del comportamento del terreno sotto l'azione dinamica di una sorgente di vibrazioni rappresenta un problema di estrema complessità, da un lato per la difficoltà insita nella scelta di parametri rappresentativi del terreno, dall'altro per la conoscenza spesso sommaria della funzione di trasferimento sorgente/ricevitore caratteristica dello stesso.

Il livello di vibrazione determinato nello spazio circostante da una sorgente eccitatrice è funzione della tipologia di sorgente e di una serie di attenuazioni dipendenti dalla forma della sorgente e dal tipo di onda considerata, dall'assorbimento del terreno, dall'eventuale presenza di discontinuità nella stessa e dal passaggio delle sollecitazioni dal terreno alle fondazioni.

La propagazione nel corpo dell'edificio è determinante sia per gli abitanti che per le strutture in quanto pavimenti, pareti e soffitti degli edifici sono soggetti a significative amplificazioni delle vibrazioni rispetto a quelle trasmesse dalle fondazioni. I problemi maggiori si verificano quando la frequenza propria dei solai coincide con la frequenza di picco dello spettro di vibrazione del terreno. In tali casi è anche possibile la comparsa di disturbo da rumore per reirradiazione delle strutture.

Le vibrazioni dovute all'esercizio ferroviario sono originate dalle azioni all'interfaccia ruota-rotaia, indotte dalla rugosità delle superfici di rotolamento, che si propagano dal veicolo in transito agli edifici circostanti attraverso la struttura del terreno. La vibrazione risultante viene percepita come moto meccanico degli elementi componenti l'edificio.

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Nel caso di tracciati caratterizzati dalla presenza di tratti in rilevato le vibrazioni al terreno 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.

Le vibrazioni all'interno degli edifici sono spesso vicine alla soglia di sensibilità umana e pertanto valutazioni adeguate debbono essere effettuate, mettendo correttamente in conto caso per caso le variabilità presenti nelle caratteristiche del suolo e nelle soluzioni progettuali adottate per gli edifici. L'impiego di misure di controllo delle vibrazioni può risultare efficace, se necessario, per ridurre i disturbi all'interno degli edifici.

Uno studio finalizzato ad una valutazione previsionale degli effetti nocivi delle vibrazioni e ai benefici prodotti dagli interventi mitigativi proposti non può pertanto prescindere dall'analisi dei tre elementi della catena di trasmissione (sorgente, mezzo di trasmissione e ricettore). Nel caso in oggetto la propagazione avviene quasi esclusivamente da sorgenti costituite da gallerie sotterranee (tunnel), e dunque le vibrazioni che si propagano nel suolo circostante assumono la forma di onde elastiche, che si propagano come onde di volume e come onde di superficie.

Le onde di volume (body waves, che si propagano in uno spazio) sono costituite da onde longitudinali (onde di tipo P), che si propagano nella direzione parallela alla direzione di propagazione della vibrazione, e da onde trasversali (o di taglio) (shear waves, o onde di tipo S), che si propagano in direzione perpendicolare alla direzione di propagazione. Ungar and Bender (1975) dimostrarono come vi sia uno scarso accoppiamento modale (e dunque una elevata perdita di energia vibrazionale) fra il tunnel e il terreno circostante per le onde di tipo trasversale (shear waves), e dunque queste onde possono essere trascurate nella propagazione delle vibrazioni di un tunnel ferroviario.

Le onde di superficie (onde di Rayleigh, che si propagano appunto lungo una superficie) si dividono in onde orizzontali (onde di tipo R, o onde di Rayleigh) e onde verticali (onde di tipo L, o onde di Love). Queste onde hanno una propagazione di tipo ellittico che si sviluppa in un piano verticale attraverso la direzione di propagazione della vibrazione.

La propagazione di tutte queste tipologie di onde si può descrivere matematicamente in modo piuttosto agevole in un mezzo elastico omogeneo e continuo, infinitamente esteso. Tuttavia, nella realtà la propagazione delle vibrazioni diventa estremamente complessa in quanto il terreno contiene discontinuità di vario genere e non è mai omogeneo. Anche la parete del tunnel, la superficie del

¹ 0 dB \cong 1 $\mu\text{m/s}^2$

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSAS – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	NTOP	00 D 22	RG	IM0004 002	A	26 di 39

terreno e le fondazioni degli edifici costituiscono delle discontinuità che complicano il modello di propagazione ideale, che dunque diventa assai complesso e tale da richiedere un approccio matematico estremamente arduo.

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

- Interazione ruota- rotaia
- Velocità del treno
- Comportamento corpo ferroviario: tipo e dimensioni della linea (tunnel, trincea, superficie, rilevato, viadotto); spessore delle pareti della infrastruttura in tunnel o in trincea
- Trasmissione nel terreno: natura e caratteristiche del suolo; leggi di attenuazione nel suolo.

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.

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...);

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSÀ – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

- 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 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.

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSAS – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

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.

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 di 6 dB nei livelli di vibrazione e ciò in maniera indipendente dalla frequenza.

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NTOP	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

5.3 LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO

5.3.1 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:

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

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	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 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"

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

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

5.3.2 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 in galleria.

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 con particolare riferimento al parametro V_{sor} .

A tal riguardo, sono stati considerati esclusivamente i valori rilevati sulle tre terne T1, T2 e T3 costituenti la sezione VIB.01 di misura in quanto:

- la sezione VIB.01 risulta posta in corrispondenza del passante Porta Nuova – Porta Susa caratterizzato da un modello di esercizio e da un parco treni similare a quello della linea di progetto;
- l'incidenza delle accelerazioni residue è inferiore e pertanto i valori ottenuti sono maggiormente significativi per la caratterizzazione della sorgente ferroviaria e la determinazione delle condizioni di propagazione;
- in fase di post elaborazione dei valori misurati sono state riscontrate delle anomalie per la campagna di rilievi in corrispondenza della sezione VIB.02, con particolare riferimento alla terna T3, per la quale si evidenziano valori di accelerazione ponderata superiori sia durante il transito dei treni sia durante il periodo "residuo" probabilmente dovute ad altre sorgenti attive durante il periodo di misura.

Dall'analisi dei rilievi eseguiti per la sezione di misura VIB.01, è stata determinata la funzione di trasferimento connessa alla propagazione delle vibrazioni nel sottosuolo rispetto al parametro V_{sor} indicato dalla norma UNI 9614:2017 quale riferimento per la valutazione del disturbo indotto dalle vibrazioni di origine ferroviaria.

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSAS – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Il modello di esercizio previsto per l'asse di progetto prevede il solo transito di treni regionali e connessi al servizio di A/V, escludendo pertanto quelli appartenenti alla categoria IC che non sono previsti transitare né sulla linea attuale, né su quella di progetto (si veda il paragrafo 8.1.2 della Relazione di Acustica NT0P00D22RGIM0004001A). Le misure eseguite e i dati calcolati riportati nel capitolo precedente si riferiscono invece al modello di esercizio attuale sulla linea passante caratterizzato dalla presenza di treni A/V, regionali e IC.

In considerazione della complessità del caso in studio è stata individuata la legge di decadimento delle onde vibrazionali considerando i dati di accelerazione rilevati durante la campagna di misura nella sezione 1 e calcolando i valori di accelerazione V_{sor} in corrispondenza delle tre terne T1, T2 e T3 sia sulla base dei 55 eventi misurati, ovvero considerando anche i transiti dei treni IC, sia escludendo questi ultimi e quindi riferendosi ai soli treni regionali e A/V propri del modello di esercizio dell'asse di progetto.

Tale scelta deriva dalla necessità di verificare le differenti condizioni di disturbo al variare del modello di esercizio considerando la eventuale presenza di IC non programmati e quindi sulla scorta di un approccio ulteriormente più cautelativo.

	MdE	Sezione 1		
		T1	T2	T3
$V_{sor} [mm/s^2]$	AV, REG e IC	24,7	25,5	7,9
	AV e REG	24,3	24,3	6,0

Tabella 5-1 Sezione di misura VIB.01: valori di accelerazione in mm/s^2 della V_{sor} calcolati in corrispondenza delle terne T1, T2 e T3 a partire dai valori rilevati e utilizzati per la determinazione del modello di propagazione delle vibrazioni nel sottosuolo

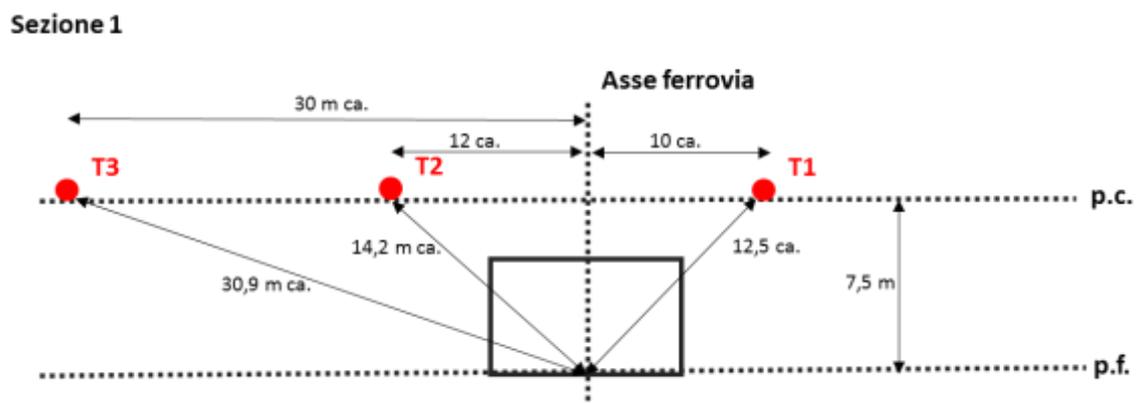


Figura 5-1 Sezione di misura VIB.01: posizione degli accelerometri nei punti T1, T2 e T3 rispetto alla linea ferroviaria oggetto di monitoraggio

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Stante il posizionamento degli accelerometri nei punti T1, T2 e T3, i valori rilevati e determinati per la Vsor sono stati utilizzati nel seguente modo:

- **Vsor nei punti T1 e T2**

La Vsor determinata per la terna T1 e T2 mette in evidenza una condizione di simmetria delle condizioni di propagazione delle vibrazioni nel terreno, comportamento non preliminarmente determinabile in ragione dell’assetto infrastrutturale della linea passante e del punto di misura posto in corrispondenza del quadrivio Zappata e che richiedeva una verifica mediante installazione simmetrica di due accelerometri;

- **Vsor nei punti T2 e T3**

La Vsor determinata per le terne T2 e T3 permette la determinazione della curva di attenuazione della accelerazione ponderata massima delle vibrazioni immesse nei ricettori dalla sorgente ferroviaria.

Come detto quindi sono state individuate due curve di attenuazione della Vsor secondo le due differenti modalità di analisi ed uso dei dati sperimentali. In figura seguente si riporta la legge di decadimento con la distanza della Vsor sulla scorta dei dati sperimentali relativi ai treni regionali, A/V e IC.



Figura 5-2 Curva di attenuazione della Vsor ricavata dai rilievi in corrispondenza delle terne T2 e T3 poste rispettivamente a 14,2 m e 30,9 m dal p.f. considerando treni regionali, A/V e IC

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSAS – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Nel grafico di figura seguente si riporta invece la curva di decadimento calcolata considerando i dati sperimentali rilevati per le terne T2 e T3 esclusivamente legati ai treni appartenenti alle categorie Regionali e Alta Velocità.

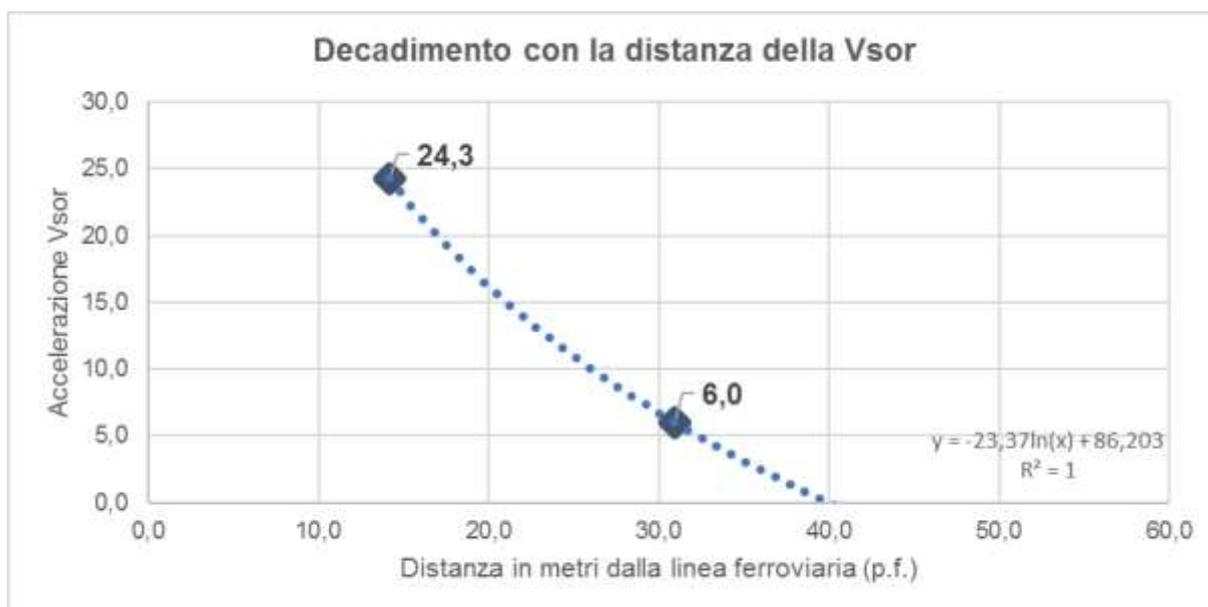


Figura 5-3 Curva di attenuazione della V_{sor} ricavata dai rilievi in corrispondenza delle terne T2 e T3 poste rispettivamente a 14,2 m e 30,9 m dal p.f. considerando treni regionali e A/V

La legge di attenuazione della V_{sor} determinata secondo i due metodi risulta differente stante i valori emissivi differenti determinati in corrispondenza delle terne T1, T2 e T3 secondo le modalità indicate dalla UNI 9614:2017. Tale differenza è rappresentata nel grafico di figura seguente. Come si evince la condizione più cautelativa per la determinazione del disturbo indotto dai transiti ferroviari sulla superficie è data dal primo metodo, ovvero considerando tutti i dati rilevati sulle terne T2 e T3 (treni regionali, IC e A/V). Tale curva sarà pertanto utilizzata nel successivo capitolo per la valutazione delle vibrazioni indotte in fase di esercizio e l'individuazione delle aree potenzialmente critiche.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

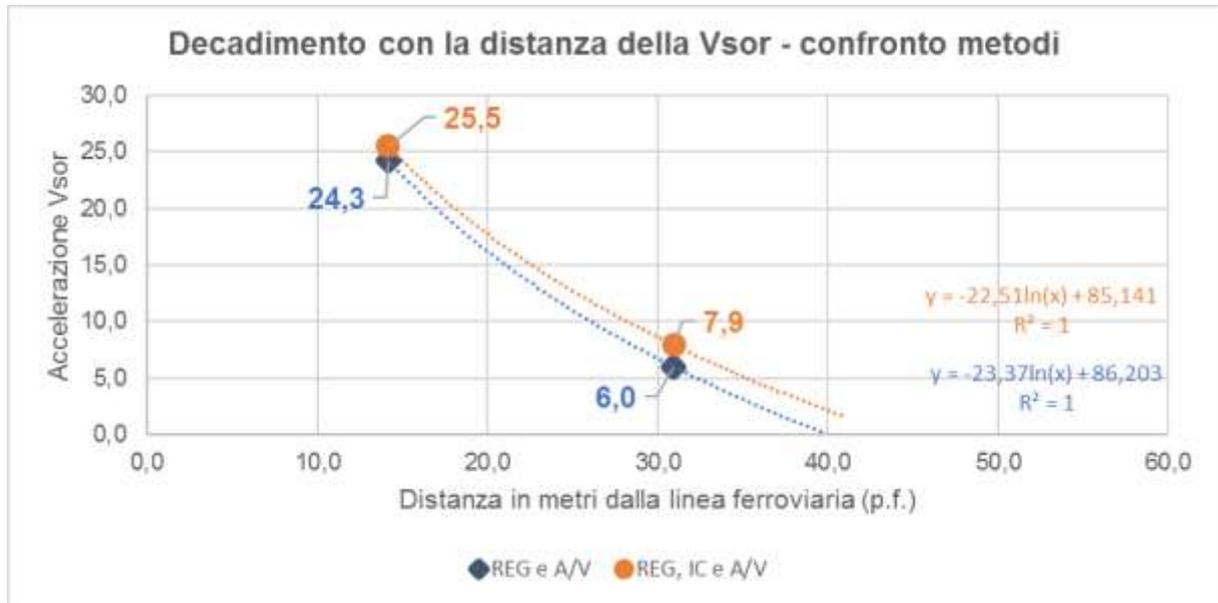


Figura 5-4 Confronto della curva di attenuazione della V_{sr} ricavata dai rilievi in corrispondenza delle terne T2 e T3 poste rispettivamente a 14,2 m e 30,9 m dal p.f. nei due metodi assunti

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

6 LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO

6.1 PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO

La norma UNI 9614, nella sua ultima versione 2017, introduce un differente criterio di valutazione del disturbo delle vibrazioni ferroviarie sui ricettori che si basa su valori di riferimento riferiti al valore massimo di accelerazione ponderata indotta da un singolo transito di un convoglio ferroviario a prescindere dal modello di esercizio della linea ferroviaria oggetto di studio e quindi dalla frequenza di accadimento del fenomeno durante l'arco temporale delle 24 ore.

Mediante la curva di ponderazione individuata nel paragrafo precedente attraverso i valori di accelerazione calcolati in corrispondenza dei punti di misura, sono state determinate le distanze dal piano del ferro, e qui dall'asse della linea ferroviaria al piano campagna, alle quali si raggiungono i valori riferimento indicati dalla UNI 9614:2017 per la valutazione del disturbo delle vibrazioni.

Ne conseguono pertanto le seguenti distanze limite, riferite all'asse del binario più esterno alla quota del piano campagna:

- Ambienti ad uso abitativo, periodo diurno (limite 7,2 mm/s²): 31,0 m
- Ambienti ad uso abitativo, periodo notturno (limite 3,6 mm/s²): 36,6 m
- Scuole ed Università (limite 5,4 mm/s²): 33,7 m
- Ospedale, limitatamente agli ambienti di degenza (limite 2,0 mm/s²): 39,4 m

La curva di attenuazione delle onde vibrazionali utilizzata nel modello previsionale si basa sui rilievi sperimentali nella sezione di misura 1 e riferiti all'intero insieme di dati rilevati e connessi ai transiti ferroviari sulla linea passante esistente costituiti da treni regionali, A/V e IC. Seppur infatti il modello di esercizio per la linea di progetto preveda solo treni regionali e di A/V, lo studio previsionale adotta un approccio maggiormente cautelativo considerando anche i valori delle accelerazioni relative alla categoria IC caratterizzanti mediamente da livelli emissivi superiori. Si evidenzia che applicando una curva di attenuazione determinata sulla scorta dei dati rilevati per le categorie di treni A/V e regionali, la differenza in termini di distanza rispetto ai valori di riferimento risulterebbe inferiore dell'ordine dei 3-4 metri, ovvero dell'ordine dello 0,5 dB in corrispondenza del ricettore più esposto. Ne consegue pertanto una invarianza delle condizioni di disturbo al variare del modello di esercizio e dell'eventuale presenza di treni IC.

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	NT0P	00 D 22	RG	IM0004 002	A	37 di 39

6.2 INDIVIDUAZIONE DELLE POTENZIALI AREE CRITICHE

Determinate le distanze di riferimento in ragione della destinazione d'uso e periodo temporale dei ricettori potenzialmente interferiti e posti ad una distanza di 50 metri dall'asse della linea ferroviaria, sono state individuate le aree potenzialmente critiche dell'asse di progetto per le quali si stima un potenziale superamento dei valori limite di riferimento e che richiedono pertanto una soluzione progettuale volta al contenimento delle vibrazioni indotte dal transito ferroviario.

Per quanto concerne i ricettori sensibili di tipo ospedaliero, dai dati ottenuti si evince che tutti gli edifici costituenti l'Ospedale Mauriziano Torino (ricettori 1044, 1043, 1042, etc.) non vengono interferiti dalle vibrazioni indotte dal transito dei convogli ferroviari lungo la linea in progetto in quanto posti ad una distanza superiore quella del limite di riferimento.

Per quanto concerne invece i ricettori con ambienti ad uso abitativo, stante i valori di riferimento indicati dalla normativa UNI 9614:2017, secondo il modello previsionale applicato si determina una condizione di disturbo per i ricettori posti in corrispondenza dell'asse della linea ferroviaria a partire dalla progressiva km 1+060 fino alla progressiva km 3+300, ovvero per i ricettori appartenenti ai seguenti gruppi:

- Residenziali: 1046 – 1056; 1059 – 1080; 1082, 1084, 1086 – 1090; 1092 – 1109; 1112 – 1121, 2078 – 2080. 2082, 2084, 2085
- Scuole ed Università: 1058a, 1058b, 1115, 1116, 1118

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NT0P	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

7 CONCLUSIONI

Il livello di esposizione alle vibrazioni dei ricettori lungo la tratta oggetto di studio è stato analizzato mediante un modello di calcolo calibrato sul territorio sulla base degli esiti delle misure condotte sull'attuale rete ferroviaria del nodo di Torino.

Le misure sono state eseguite su due sezioni differenti, denominate VIB.01 e VIB.02, poste la prima lungo la linea passante Porta Nuova – Porta Susa nel tratto di galleria tra largo Turati e il quadrivio Zappata all'interno dell'area verde "Giardini Cesare Valperga di Masino", e la seconda in corrispondenza della linea Torino – Modane tra il quadrivio Zappata e Largo Orbassano all'interno dell'area verde "Giardini della Clessidra". Ciascuna sezione è caratterizzata da tre punti di monitoraggio denominati T1, T2 e T3.

La metodologia di misura e di analisi del disturbo sugli edifici si riferisce a quella specificata dalla norma UNI 9614:2017, ovvero attraverso il rilievo delle accelerazioni lungo gli assi x, y e z e la determinazione delle accelerazioni immesse dalla sorgente ferroviaria e delle altre sorgenti in termini di accelerazione ponderata massima statistica.

Sulla scorta dell'applicazione del modello previsionale specifico per l'opera in progetto e il contesto territoriale di riferimento, sono state individuate le distanze alle quali vengono raggiunti i valori di riferimento indicati dalla norma UNI 9614:2017 per i ricettori in funzione della loro destinazione d'uso. Si evidenzia nuovamente come il modello previsionale applicato si basi sui dati sperimentali rilevati per tutte le categorie di treni, ovvero considerando anche gli IC caratterizzati mediamente da livelli di accelerazione superiori. Tale impostazione risulta pertanto maggiormente cautelativa nella determinazione delle distanze riferite ai valori limite data la minor attenuazione delle onde vibrazionali. Ciò nonostante dai dati rilevati in entrambe le condizioni operative si evidenzia dai dati calcolati una di fatto invarianza delle condizioni di disturbo al variare del modello di esercizio e dell'eventuale presenza di treni IC.

Considerando quindi tali distanze come rappresentative delle condizioni limite per la valutazione del disturbo sugli edifici indotto dal traffico ferroviario, si evince una condizione di potenziale criticità per la tratta della linea in progetto compresa tra le progressive pk 1+060 e 3+300.

Al fine di eliminare/ridurre le criticità che si presentano lungo il tracciato, sono previsti alcuni interventi di mitigazione in grado di ridurre le immissioni vibrazionali tali per cui i livelli immessi sui ricettori indotti dai transiti ferroviari siano inferiori al limite normativo fissato dalla UNI 9614:2017 a 3,6 mm/s² (71,1 dB) per il periodo notturno. Considerando infatti la distanza minima tra i ricettori e la linea ferroviaria occorre prevedere in via cautelativa un sistema di riduzione delle vibrazioni in grado di abbattere di circa 20 dB i livelli immessi sugli edifici dalla sorgente ferroviaria anche in

	NODO DI TORINO COMPLETAMENTO LINEA DIRETTA TORINO PORTA SUSA – TORINO PORTA NUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE STUDIO VIBRAZIONALE	COMMESSA NTOP	LOTTO 00 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

considerazione dell'occorrenza di passaggi di convogli contemporaneamente su più binari che, ai fini della valutazione del disturbo, è da considerarsi secondo la UNI 9614:2017 (appendice A2) come unico evento (raddoppio della sorgente emissiva).

Adottando un approccio di tipo cautelativo si ritiene opportuno estendere l'adozione di tali interventi di mitigazione all'intera tratta della linea in galleria, ovvero dalla pk 0+675 alla pk 3+300, anche in relazione alla presenza di edifici sensibili in prossimità dell'imbocco della galleria.