

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO

NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA

U.O. ARCHITETTURA, AMBIENTE E TERRITORIO

PROGETTO DEFINITIVO

TRATTA NUOVA ENNA – DITTAINO (LOTTO 4B)

STUDIO VIBRAZIONALE

Relazione generale

SCALA:

-

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

RS3V 40 D 22 RG IM0004 002 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
A	Emissione Esecutiva	C.Giannobile	Dicembre 2019	E.Zola A.Gorvaja	Dicembre 2019	F. Sparacino	Dicembre 2019	D.Ludovici	Dicembre 2019



File: RS3V40D22RGIM0004002A

n. Elab.: 943

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Indice

1	RIFERIMENTI NORMATIVI	2
1.1	IL QUADRO DELLE NORME DI RIFERIMENTO	2
2	AREA DI STUDIO.....	7
2.1	INQUADRAMENTO TERRITORIALE	7
2.2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	9
3	INDAGINI VIBRAZIONALI	12
3.1	RILIEVI DI VIBRAZIONI IN SITU	12
3.2	SINTESI DEI DATI RILEVATI.....	13
4	MODELLO PREVISIONALE.....	14
4.1	LE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO	14
4.2	CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE DI VIBRAZIONI	14
4.2.1	Interazione ruota-rotaia	14
4.2.2	Velocità dei treni.....	16
4.3	LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO	17
4.3.1	La propagazione delle onde vibrazionali.....	17
4.3.2	La determinazione della funzione di trasferimento.....	19
5	LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO	24
5.1	PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO	24
5.2	INDIVIDUAZIONE DELLE POTENZIALI AREE CRITICHE.....	25
	CONCLUSIONI.....	28

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 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,

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

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).

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 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.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

2 AREA DI STUDIO

2.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

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



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

Il presente documento contiene i risultati dello studio relativo all'impatto vibrazionale prodotto dalla realizzazione del progetto ferroviario del binario di raddoppio della tratta "Nuova Enna – Dittaino", Lotto 4b nell'ambito del nuovo collegamento Palermo - Catania.

Il tracciato di progetto, un binario unidirezionale, di lunghezza pari a circa 15 km, si sviluppa quasi interamente in variante alla Linea Storica esistente, dalla Nuova Stazione di Enna a Dittaino, allacciandosi al Lotto 5 della stessa Linea di progetto nuovo collegamento Palermo-Catania.

Dei 15 km di tracciato, circa 8,5 km si sviluppano in galleria (Galleria "Nuova Enna" di lunghezza pari a circa 6.300 m e Galleria "Dittaino" di lunghezza pari a circa 2.200 metri).

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p align="center">DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE</p>					
<p>STUDIO VIBRAZIONALE Relazione</p>	<p>COMMESSA RS3V</p>	<p>LOTTO 40 D 22</p>	<p>CODIFICA RG</p>	<p>DOCUMENTO IM0004 002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 8 di 29</p>

Viadotti e rilevati si alternano nelle parti allo scoperto, con presenza di brevi tratte in trincea.
L'iter metodologico è seguito nel rispetto del Manuale di Progettazione RFI delle Opere Civili cod.
RFI DTC SI AM MA IFS 001 B del 21.12.2018.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

2.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Uno degli aspetti fondamentali nella propagazione delle onde vibrazionali indotte dall'esercizio di una linea ferroviaria, è definito dall'attenuazione dovuta alle caratteristiche fisiche del terreno. Per la caratterizzazione geologica dell'area di studio, si è fatto riferimento allo studio geologico della linea ferroviaria in progetto.

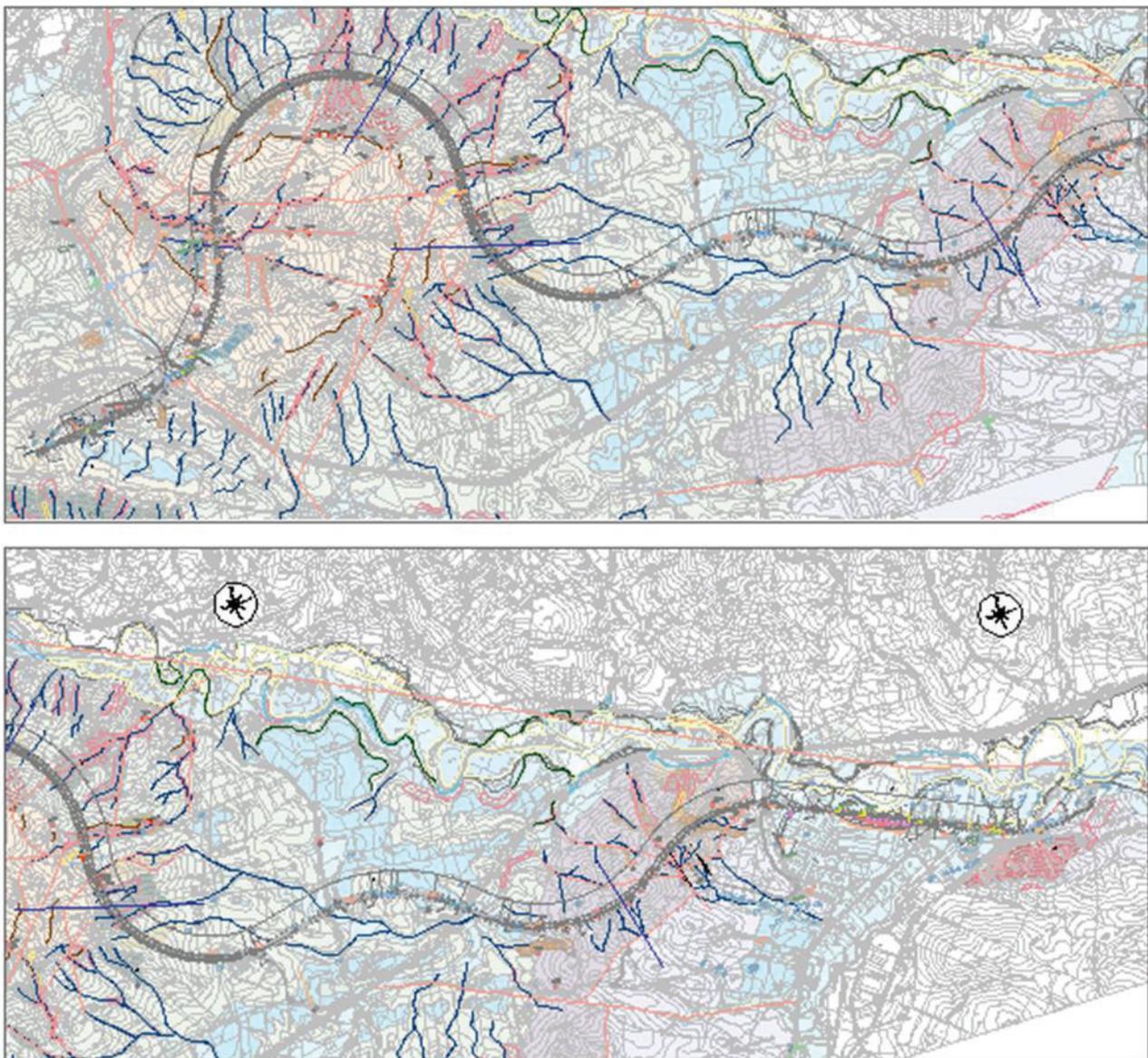


Figura 2-2 Stralcio della carta geologica con elementi di geomorfologia – inquadramento della linea di progetto

STUDIO VIBRAZIONALE

Relazione

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40 D 22	RG	IM0004 002	A	10 di 29

DEPOSITI DI VERSANTE

Coltri eluvio-colluviali

Depositi continentali di versante e di alterazione del substrato.
Olocene - Attuale



DEPOSITI ALLUVIONALI

Depositi alluvionali attuali e recenti

Depositi continentali di canale fluviale, conoide alluvionale e plana inondabile a composizione sostanzialmente ghiaioso-sabbiosa. Poggiano in contatto stratigrafico discordante sulle unità più antiche.

(ba) Ghiaie e ciottoli poligenici ed eterometrici, da sub-arrotondati ad arrotondati, sabbie e sabbie limose in matrice limoso-argillosa. Il colore è generalmente marrone e ocra, la struttura indistinta o laminata.

(bb) Ghiaie e ciottoli poligenici ed eterometrici, da sub-arrotondati ad arrotondati, sabbie e sabbie limose in matrice limoso-argillosa con possibili intercalazioni di argille limose. Il colore è generalmente marrone e ocra, la struttura indistinta o laminata.
Olocene - Attuale



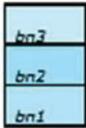
Depositi alluvionali terrazzati

Depositi continentali di canale fluviale, argine, conoide alluvionale, lago di meandro e canale in fase di abbandono, a composizione ghiaioso-sabbiosa, sabbioso-limosa e limoso-argillosa. Poggiano in contatto stratigrafico discordante sulle unità più antiche. Lo spessore massimo è di circa 15 m.

(bn3) Depositi alluvionali terrazzati di III° ordine; sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi di colore grigio, ocra e giallastro, a struttura indistinta o laminata, con locali ghiaie poligeniche da angolose ad arrotondate e rari blocchi angolosi; ghiaie poligeniche ed eterometriche (Ø max 10 cm circa), da sub-angolari ad arrotondate, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa di colore avana, nocciola, marrone, grigio e giallastro, da scarsa ad abbondante, talora sono presenti ciottoli e blocchi, da angolosi a sub-angolosi. A luoghi si rinvengono passaggi di argille limose e limi argillosi, talora debolmente sabbiosi, localmente con ghiaia di colore avana, nocciola, marrone e grigio.

(bn2) Depositi alluvionali terrazzati di II° ordine; sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi a struttura indistinta o laminata, con locali ghiaie poligeniche da angolose ad arrotondate e rari blocchi angolosi; ghiaie poligeniche ed eterometriche, da sub-angolari ad arrotondate, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa da scarsa ad abbondante, talora sono presenti ciottoli e blocchi, da angolosi a sub-angolosi. A luoghi si rinvengono passaggi di argille limose e limi argillosi, talora debolmente sabbiosi, localmente con ghiaia.

(bn1) Depositi alluvionali terrazzati di I° ordine; sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi a struttura indistinta o laminata, con locali ghiaie poligeniche da angolose ad arrotondate e rari blocchi angolosi; ghiaie poligeniche ed eterometriche, da sub-angolari ad arrotondate, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa da scarsa ad abbondante, talora sono presenti ciottoli e blocchi, da angolosi a sub-angolosi. A luoghi si rinvengono passaggi di argille limose e limi argillosi, talora debolmente sabbiosi, localmente con ghiaia.
Pleistocene superiore - Olocene



UNITÀ DELLA CATENA APPENNINICO-MAGHREBIDE

Sabbie di Cozzo Campana

Sabbie e arenarie arkosiche giallastre a cemento carbonatico discordanti sui Tripoli e sulle Argille della F.ne Terravecchia.
Messiniano superiore



Formazione di Pasquasia

Marne, marni e argillose e argille marnose di colore grigiastro, con livelli di sabbie rosso-brunastre, argille con fitte intercalazioni di lamine gessose con alternati strati e banchi con potenze metriche di gessoareniti, talora a struttura alabastrina, di torbioli gessose e di gesso balatino. Lo spessore non supera i 200m. Depositi di badno evaporitico.
Messiniano superiore



Formazione di Cattolica

Depositi lagunari e di bacino evaporitico, costituiti da tre differenti litofacies a composizione calcareo-gessosa, gessoso-argillosa e argilloso-brecciata. Poggiano in contatto stratigrafico discordante sulla Formazione Terravecchia. Lo spessore massimo è di circa 40 m.

(GTL1) Calcarei cristallini di colore grigio-biancastro, da massivi a laminati, con livelli lenticolari di breccie calcaree e locali passaggi di argille limose e argille marnose grigie; a luoghi si rinvengono lamine di gesso e pseudomorfismi di cristalli sferulitici.

(GTL2) Gessi microcristallini laminati e gessi massivi in grossi cristalli geminati, talora alternati ad argille gessose bianche; a luoghi si rinvengono intercalazioni di lamine algali e gessoliti di colore grigio e biancastro, in strati da molto sottili a sottili.

(GTL3) Argille limose e limi argillosi di colore grigio e nocciola, a struttura brecciata o a blocchetti poliedrici, con datti evaporitici di gesso; a luoghi si rinvengono passaggi di calcari evaporitici e breccie calcaree di colore grigio e biancastro.
Messiniano superiore



Tripoli

Diatomi e marni diatomitiche laminati e fissili di colore biancastro, con resti di pesi, alternate a marni laminati con abbondanti foraminiferi planctorici, talora bituminose (TPL). Spessore inferiore a 30 m. Depositi di badno euzoico.
Messiniano inferiore



Formazione Terravecchia

Depositi di plana fluvio-deltizze, depositi marini di piattaforma continentale, di scarpata, base scarpata e conoide torbiditica costituiti da tre differenti litofacies a composizione argilloso-marnosa, conglomeratico-sabbiosa e argilloso-brecciata. Poggiano in contatto stratigrafico discordante sul Pliocene Numidico e sulle Argille Variegata.

Argille limose e argille marnose di colore grigio, grigio-azzurro e grigio-verdastro, marnone per alterazione, a struttura scagliosa o sottilmente stratificata, talora con laminati e con strati irregolari e lentiformi, con frequenti livelli millimetrici di sabbie e sabbie limose grigie e giallastre; a luoghi si rinvengono passaggi di marni, marni argillose e argilliti di colore grigio e grigio-verdastro, a struttura scagliosa o sottilmente stratificata.

(TRVa) Sabbie e arenarie grigie e giallastre, a stratificazione incrociata a grado di cementazione variabile da basso ad elevato, con intercalazioni di conglomerati poligenici ad elementi eterometrici in livelli, lenti e banchi di spessore da decimetrico a metrico; a luoghi si rinvengono di argille limose e argille marnose grigie in livelli da decimetrici a metrici e porzioni fischoidi.

(TRVb) Argille, argille limose e limi argillosi di colore grigio e marrone, a struttura brecciata o a blocchetti poliedrici, talora scagliosa o indistinta; a luoghi si rinvengono passaggi di argille marnose e argilliti di colore grigio-verdastro, a struttura brecciata o finemente scagliosa, e ciottoli eterometrici di quarzareniti numidiche (F/N) e argille variegata (AV).

(TRVc) Conglomerati a ciottoli poligenici ed eterometrici, da sub-arrotondati ad arrotondati, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa di colore grigio, rosso e giallastro, generalmente abbondante, da poco a ben cementata; a luoghi sono presenti intercalazioni di arenarie giallastre e livelli di sabbie grossolane grigie e rossastre, in strati da sottili a spessi.
Tortoniano inferiore - Messiniano inferiore

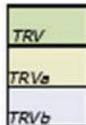


Figura 2-3 Stralcio della carta geologica con elementi di geomorfologia – legenda

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A	FOGLIO 11 di 29

L'analisi delle caratteristiche geologiche del territorio ha evidenziato come per quanto riguarda i tratti della linea ferroviaria allo scoperto, il tracciato interessa terreni appartenenti alle categorie “Depositi di versante” e “Depositi alluvionali”. Al contrario per quanto riguarda i tratti in galleria, la tipologia di terreno risulta appartenente alle Unità della Catena Appenninco-Maghrebide, ovvero sabbie, argille, depositi lagunari.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

3 INDAGINI VIBRAZIONALI

3.1 RILIEVI DI VIBRAZIONI IN SITU

È stata eseguita una campagna di rilievi vibrometrici in corrispondenza di una sezione lungo l'attuale linea ferroviaria. 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.

La sezione di misura è costituita da tre terne accelerometriche T1, T2 e T3 in grado di rilevare le immissioni vibrazionali totali e specifiche dei transiti ferroviari lungo i tre assi X, Y e Z per un periodo di 24 ore.



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

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 5 metri dall'asse del binario più esterno, su terreno sciolto;
 - Terna 2 (T2): a circa 25 metri dai binari dell'asse più esterno su un terreno analogo a quello della Terna 1;
 - Terna 3 (T3): a circa 55 metri dai binari su un terreno analogo a quello delle Terne 1 e 2.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

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 lungo la linea oggetto di studio, si riferiscono ad un periodo di osservazione pari a 24 ore per un totale di 15 transiti, tutti 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 RS3V40D22RHIM0004002A.

Di seguito, si riporta una tabella di sintesi con indicati, per ciascuna 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. Tutti i transiti campionati sono riferiti alla tipologia di treni passeggeri connessi al servizio regionale locale a composizione fissa, pertanto non è stata applicata nessuna differenziazione per tipologia di treno.

Postazione	T1-X	T1-Y	T1-Z	T2-X	T2-Y	T2-Z	T3-X	T3-Y	T3-Z
VIB01	79,6	80,1	78,9	77,3	77,7	76,6	72,4	67,3	65,4

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.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

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 collinare caratterizzato dall'alternarsi di aree agricole e residenziali a bassa densità abitativa con tipologia edilizia residenziale perlopiù ad un piano 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.

Il progetto in esame prevede l'alternanza di tratte scoperte a tratte in galleria e pertanto nel presente studio si è reso necessario adottare due diverse metodologie per la caratterizzazione previsionale della propagazione delle vibrazioni ferroviarie.

Nei paragrafi successivi vengono descritte in modo dettagliato le metodologie utilizzate e i risultati ottenuti dai due modelli di calcolo previsionale utilizzati.

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,

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

ma a causa delle imperfezioni e irregolarità superficiali di ruota, rotaia nonché delle variazioni nel tipo di supporto della rotaia il carico statico eserciterà una forza dinamica, che si trasforma in vibrazioni generate nel punto di contatto ruota-rotaia e trasmesse nel terreno circostante. I parametri che influenzano il livello e le caratteristiche delle vibrazioni indotte dal passaggio del treno sono:

- **Vibrazioni indotte dalla risposta della struttura del binario:**
 - Carico statico assiale (peso del treno e spaziatura interassiale);
 - Geometria e composizione del treno (tipo, lunghezza...);
 - Velocità del treno.
- **Interfaccia ruota-rotaia**
 - Imperfezioni della ruota (eccentricità, sbilanciamento, zone piatte, asperità);
 - Andatura instabile dei veicoli ferroviari;
 - Accelerazione e decelerazione del treno.
- **Imperfezioni della rotaia**
 - Qualità della rotaia (corrugamenti, corrosione, asperità, giunti...),
 - Curve e chicane (forze centrifughe)
- **Variazioni nella struttura di supporto**
 - Geometria e rigidità della struttura di supporto (traversine, ballast e terreno),
 - Presenza di ghiaccio.

Un aumento del carico assiale aumenta ovviamente il carico dinamico generato dal passaggio del treno. Il raddoppio del carico assiale può aumentare i livelli di vibrazione da 2 a 4 dB (Kurzweil, 1979). La composizione dei treni ha inoltre un impatto notevole sulla generazione di vibrazioni, così come la velocità stessa del treno può portare a notevoli incrementi di vibrazione: secondo Kurzweil (1979) un raddoppio della velocità può comportare un aumento di vibrazione da 4 a 6 dB. 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.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

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.

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

- V e V_0 :sono le rispettive velocità di transito dei treni

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

4.3 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:

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

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

di struttura sotto sollecitazioni dinamiche, le rocce sciolte, risultano di gran lunga più sensibili. La loro risposta alla azione di disturbo è diversa a seconda che l'intensità del disturbo sia lieve o al contrario forte: in altre parole il comportamento dei materiali sciolti è fortemente non lineare. Nel primo caso non si ha una vera variazione della struttura mentre nel secondo caso la vibrazione produce per tutte le rocce sciolte un assestamento e quindi una riduzione di porosità. Ciò avviene in misura maggiore per le rocce incoerenti poiché i granuli sottoposti a vibrazione perdono resistenza di attrito e quindi vengono favoriti fenomeni di scorrimento con assestamenti.

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

Tipo di Terreno	Densità [t/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:

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

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

dove:

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

4.3.2 La determinazione della funzione di trasferimento

Tratte a raso-rilevato

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).

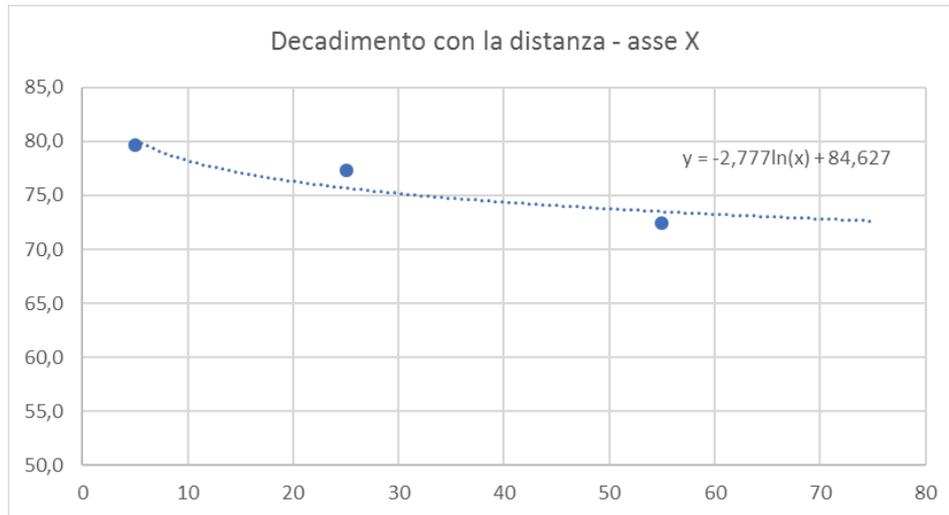


Figura 4-1 Curva di attenuazione del Leq,te in funzione della distanza dal binario, ricavata dai rilievi lungo l'asse X, in corrispondenza della Terna 1 (5 metri), della Terna 2 (25 metri) e della Terna 3 (55 metri) e relativa al totale dei transiti ferroviari rilevati durante il periodo di osservazione.

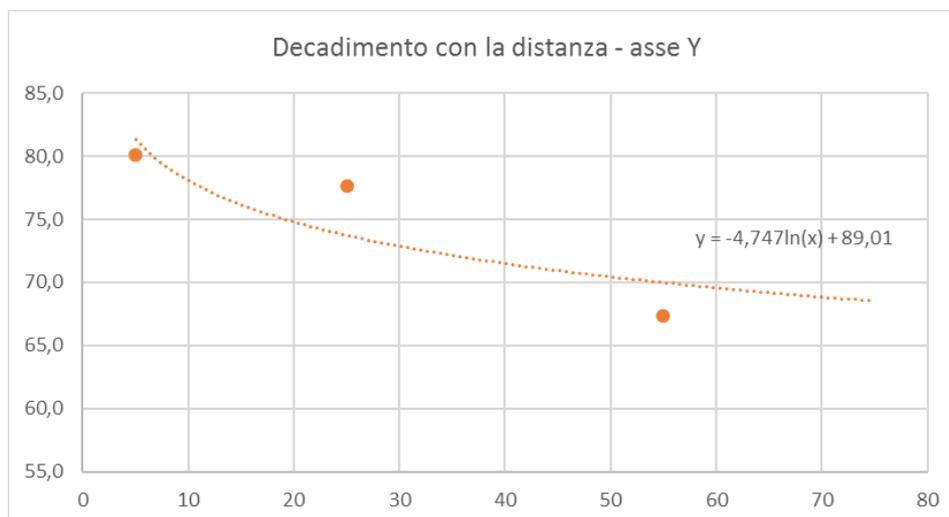


Figura 4-2 Curva di attenuazione del Leq,te in funzione della distanza dal binario, ricavata dai rilievi lungo l'asse Y, in corrispondenza della Terna 1 (5 metri), della Terna 2 (25 metri) e della Terna 3 (55 metri) e relativa al totale dei transiti ferroviari rilevati durante il periodo di osservazione.

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

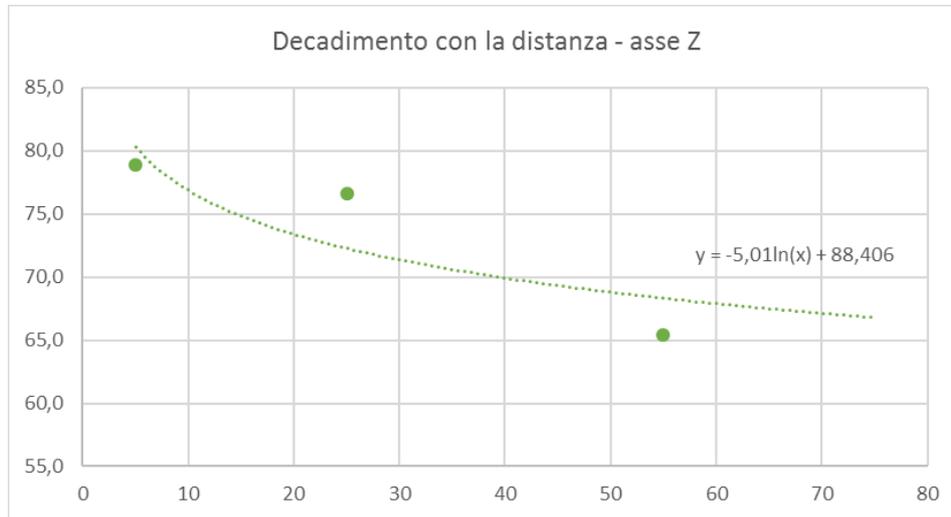


Figura 4-3 Curva di attenuazione del Leq,te in funzione della distanza dal binario, ricavata dai rilievi lungo l’asse Z, in corrispondenza della Terna 1 (5 metri), della Terna 2 (25 metri) e della Terna 3 (55 metri) e relativa al totale dei transiti ferroviari rilevati durante il periodo di osservazione.

Tratte in galleria

Nel caso specifico delle tratte in galleria, non avendo a disposizione dati relativi alla propagazione delle onde vibrazionali indotte dai transiti ferroviari, le analisi si sono basate sul modello di propagazione teorico definito dal metodo di Kim e Lee che combina l’attenuazione geometrica e dissipativa secondo la seguente relazione per materiali omogenei (valido per tutti i tipi di onde P, S ed R):

$$a(d, f) = a_0(d_0, f) \cdot \frac{r_0}{r} \cdot e^{-2\pi f \left(\frac{\eta}{c}\right)(r-r_0)}$$

dove a è l’accelerazione alla distanza r dalla sorgente, a₀ è l’ampiezza alla distanza r₀ dalla sorgente, f la frequenza, η il coefficiente di smorzamento, c la velocità di propagazione delle onde. Il fattore di smorzamento, η può essere desunto da dati di letteratura, mentre il coefficiente n dipende dal tipo di sorgente di vibrazioni e dal tipo di onda.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

<i>Localizzazione della sorgente</i>	<i>Tipologia di sorgente</i>	<i>Tipo di onda indotta nel terreno</i>	<i>coefficiente n</i>
Superficie	Puntiforme	Onda di volume	2,0
		Onda superficiale	0,5
	Lineare	Onda di volume	1,0
		Onda superficiale	0
Sotterranea	Puntiforme	Onda di volume	1,0
	Lineare		0,5

Il coefficiente n , in questo caso, è stato scelto pari a 0,5 (valido per onde di volume nel caso di sorgente lineare).

Dalle analisi delle caratteristiche geologiche del territorio e dal tracciato in galleria si evince come per la galleria “Sicani” e “Nuova Enna” il terreno sia prevalentemente composto da sabbie mentre per la galleria “Dittaino” da argille. Ai fini dello studio vibrazionale le due tipologie di terreni presentano caratteristiche simili alla propagazione delle onde vibrazionali con valori del fattore di perdita η e della velocità di propagazione delle onde c che possono essere assunti pari a 0,2 e 1500 m/s.

TIPO DI TERRENO	DENSITA' [t/m ³]	FATTORE PERDITA η
Roccia compatta	2.65	0.01
Sabbia, limo, ghiaia, loess	1.6	0.1
Argilla, terreni argillosi	1.7	0.2+0.5
Molasse	2.25	0.05
Scisti cristallini	2.25	0.05
Depositi alluvionali	1.83	0.05
Calcari evaporitici	2.25	0.05

Tabella 4-1 Fattore di perdita η per tipologia di terreno

Per quanto riguarda la sorgente emissiva vibrazionale si è fatto riferimento al valore di accelerazione riferito ad un singolo transito di un convoglio ferroviario a 1 metro di distanza dall’asse del binario secondo i valori rilevati dai rilievi in situ precedentemente descritti i cui risultati sono riportati nel documento RS3V40D22RHIM0004002A e normalizzati rispetto ad una velocità di percorrenza di 200 km/h rappresentativa del treno maggiormente critico. Seppur tale velocità risulta riferita esclusivamente alla categoria di treni IC, in quota marginale rispetto alle altre, si ritiene opportuno introdurre un ulteriore fattore cautelativo nella valutazione del disturbo da vibrazioni connesse alla linea ferroviaria di progetto nei tratti in galleria.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

L'ambito di studio è stato ampliato sino ad una profondità della galleria pari a 50 metri. I ricettori censiti e ricadenti in tale ambito sono rappresentati graficamente negli elaborati Planimetria di censimento dei ricettori, cod. RS3V40D22P6IM0004001A÷ 9A.

Applicando pertanto la formula indicata nel paragrafo 4.2.2, si evince come il livello di accelerazione ad 1 metro dall'asse del binario connesso ad un transito di un convoglio ferroviario sia pari a 101 dB.

Dall'analisi previsionale utilizzando i dati sperimentali emissivi caratteristici di un singolo transito ferroviario di un convoglio passeggeri unitamente al contesto orografico ed antropico dell'area interessata di seguito si riporta la funzione di trasferimento determinata per un singolo transito di un convoglio ferroviario e applicata per la valutazione dell'entità del disturbo indotto dall'intero esercizio della linea ferroviaria.

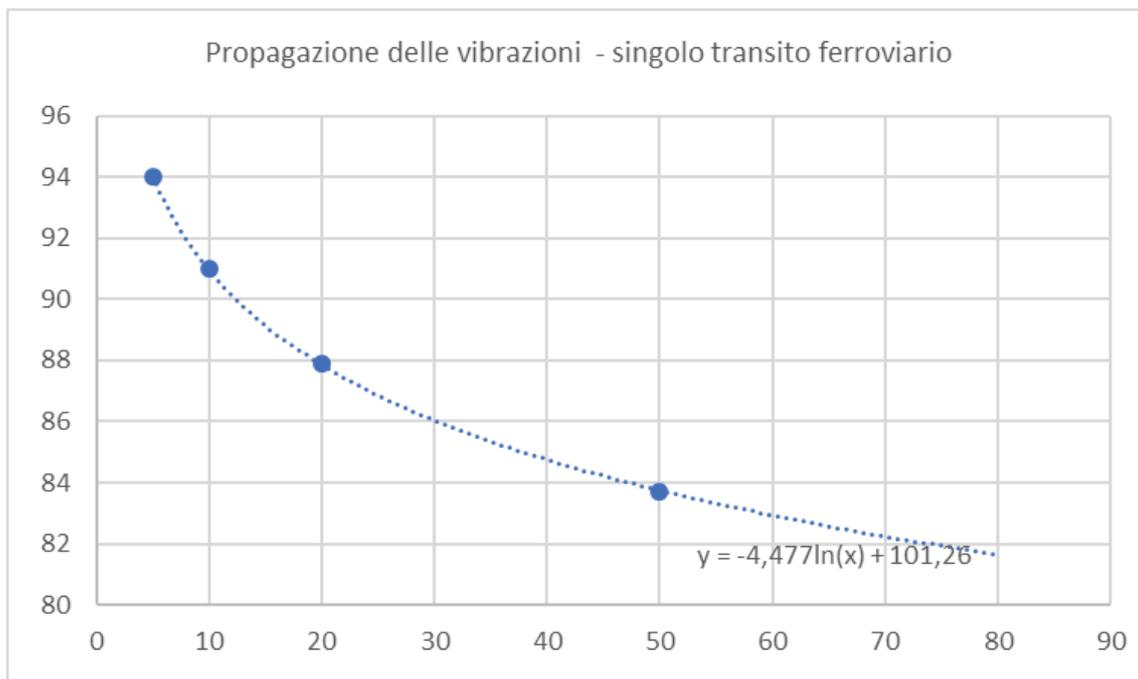


Figura 4-4 Funzione di trasferimento per la propagazione delle vibrazioni determinata per un singolo transito di un convoglio ferroviario

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 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

Lo studio previsionale vibrazionale è stato esteso per il tratto di linea ferroviaria oggetto di studio sia alla macrofase 1 del nuovo collegamento Palermo-Catania sia alla macrofase 2, in ragione del differente modello di esercizio previsto nei due scenari e ad un conseguente incremento dei transiti anche sulla linea di nuova realizzazione oggetto di studio. Tale approccio risulta maggiormente cautelativo in quanto si intende verificare anche una condizione di esercizio di futura realizzazione non oggetto di studio, in quanto l'orizzonte di progetto è in questa fase quello della macrofase 1.

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 per la tratta Lotto 4B, Enna-Dittaino oggetto di studio.

Linea	Tipologia treno	Lotto 4B Enna-Dittaino			
		Scenario Fase 1		Scenario Fase 2	
		Diurno	Notturmo	Diurno	Notturmo
Linea nuova	Intercity	11	1	14	2
	Regionali Veloci	26	4	32	4
	Merci	3	1	5	2
Linea esistente	Regionali	11	1	22	2
Totali linea nuova		40	6	51	8
Totali linea storica		11	1	22	2

Tabella 5-1 Modello di esercizio previsto dal progetto lungo la tratta 4B Enna-Dittaino

Per le tratte scoperte 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, previa correzione in funzione della velocità di progetto nelle diverse tratte a partire da quella media rilevata durante le indagini (circa 50 km/h) secondo la formula indicata al paragrafo 4.2.2.

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) per i tre punti T1, T2 e T3 e quindi la distanza dall'asse del binario più esterno alla quale viene raggiunto il livello di accelerazione indicato dalla UNI 9614:1990 per i due periodi temporali di riferimento (77 dB diurno, 74 dB notturno).

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Per quanto concerne invece le tratte in galleria, utilizzando i dati sperimentali emissivi caratteristici di un singolo transito ferroviario unitamente al contesto orografico ed antropico dell'area interessata è stata calcolata la funzione di propagazione per un singolo transito e applicata per la valutazione dell'entità del disturbo indotto dall'intero esercizio della linea ferroviaria secondo la metodologia indicata al 4.3.2.

Anche in questo caso sono state individuate le distanze alle quali vengono raggiunti i valori di riferimento indicati dalla UNI 9614:1990 per il periodo diurno e notturno in funzione del modello di esercizio previsto.

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 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.

Per l'individuazione delle aree critiche sono state calcolate le distanze dall'asse della ferrovia alle quali vengono raggiunti i suddetti valori soglia in funzione del modello di esercizio, velocità di percorrenza considerando distintamente i tratti allo scoperto e quelli in galleria. Cautelativamente è stata considerata una velocità di percorrenza di 200 km/h per tutte le tipologie di convogli ferroviari. Per quanto concerne i tratti della linea ferroviaria allo scoperto, le analisi sono state differenziate considerando tre casistiche:

- Solo linea di progetto, considerando esclusivamente i transiti previsti sulla linea di nuova realizzazione;
- Solo linea attuale, considerando il modello di esercizio previsto per la linea storica;
- Linee in affiancamento, limitatamente ai tratti delle due linee ferroviarie in adiacenza per i quali sono stati considerati il numero totale di transiti ferroviari nei due periodi temporali.

Per quanto riguarda invece le gallerie in progetto "Sicani", "Nuova Enna" e "Dittaino" sono stati considerati i soli transiti ferroviari previsti per il nuovo collegamento.

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Come detto in precedenza l'individuazione delle distanze critiche, ovvero quelle per le quali si raggiungono i valori di riferimento previsti dalla UNI 9614:1990 per i due periodi temporali (77 dB nel periodo diurno e 74 dB per quello notturno), è stato effettuato sia per lo scenario di fase 1 che di fase 2. Tale impostazione permette fin da subito di individuare le eventuali soluzioni mitigative per la nuova linea già in fase di progettazione anche per modelli di esercizio futuri rispetto a quello di fase 1 oggetto di analisi.

In Tabella 5-1 si riportano i risultati ottenuti:

Fase 1

Tipo Sezione	Tratta	Distanza limite diurno (m) (Lw 77 dB)	Distanza limite notturno (m) (Lw 77 dB))
Aperto	LN	3 m	2 m
	LS	2 m	1 m
	LN e LS in affiancamento	4 m	2 m
Galleria	LN	5 m	3 m

Tabella 5-2 Individuazione delle distanze critiche, ovvero le distanze dall'asse del binario alle quali si raggiungono i livelli di accelerazione indicati dalla UNI 9614:1990, secondo il modello di esercizio di fase 1

Fase 2

Tipo Sezione	Tratta	Distanza limite diurno (m) (Lw 77 dB)	Distanza limite notturno (m) (Lw 77 dB))
Aperto	LN	4 m	3 m
	LS	2 m	1 m
	LN e LS in affiancamento	5 m	3 m
Galleria	LN	7 m	4 m

Tabella 5-3 Individuazione delle distanze critiche, ovvero le distanze dall'asse del binario alle quali si raggiungono i livelli di accelerazione indicati dalla UNI 9614:1990, secondo il modello di esercizio di fase 2

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

Considerando le distanze calcolate per le diverse condizioni di analisi individuate, dall'analisi territoriale eseguita per il censimento dei ricettori nell'ambito dello studio acustico e vibrazionale (rif. elaborati RS3V40D22P6IM0004001A ÷ RS3V40D22P6IM0004009A) si evince che nessun ricettore residenziale è potenzialmente interferito dalle vibrazioni indotte dal transito dei convogli ferroviari sia lungo la linea ferroviaria di nuova realizzazione che lungo la linea storica.

Per ciascun edificio abitativo i livelli di accelerazione risultano essere inferiori a quelli indicati dalla UNI 9614:1990 come riferimento per la valutazione del disturbo da vibrazioni, ovvero 77 dB nel periodo diurno e 74 dB in quello notturno.

Verificando le stesse condizioni di esposizione alle vibrazioni di origine ferroviaria per i tratti in galleria, si evince come dal profilo altimetrico del tracciato le condizioni di potenziale criticità in ragione della differenza di quota tra il terreno e il piano del ferro, siano localizzate esclusivamente in corrispondenza degli imbocchi laddove la distanza tra il corpo ferroviario e il ricettore è minima. Dall'analisi planimetria dei ricettori censiti nell'ambito dello studio acustico e vibrazionale, non si evincono condizioni di disturbo da vibrazioni con valori dei livelli di accelerazione per i ricettori residenziali inferiori a quelli soglia individuati dalla UNI 9614:1990. I ricettori potenzialmente più critici risultano essere il 3007 posto in corrispondenza dell'imbocco est della galleria "Sicani" e il 1017 in prossimità dell'imbocco est della galleria "Dittaino". Ciò nonostante dai risultati emersi dallo studio analitico per questi si stimano livelli inferiori a quelli limite previsti dalla norma UNI 9614:1990.

Per quanto concerne quindi la linea nuova Enna – Dittaino non si evincono condizioni di criticità per quanto concerne il tema delle vibrazioni indotte dal transito dei convogli ferroviari sia per lo scenario di fase 1 che di fase 2. Tale condizione di non criticità viene verificata anche per i tratti della linea storica oggetto di studio.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

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".

Per la stima dei livelli di accelerazione in corrispondenza della ferrovia si è reso necessario distinguere la metodologia di studio per le tratte della linea ferroviaria allo scoperto e per quelle invece in galleria. Le analisi sono state poi differenziate per la fase 1 e la fase 2 al fine di individuare fin da subito eventuali condizioni di criticità secondo modelli di esercizio differenti rispetto a quello di progetto della fase 1 e quindi poter in fase di progettazione prevedere opportune soluzioni mitigative che permettano il contenimento delle vibrazioni sui ricettori.

Il modello previsionale assunto per le tratte all'aperto si basa sull'individuazione di una legge di propagazione tarata in funzione dei valori misurati nelle tre terne di misura T1, T2 e T3 poste a determinate distanze dall'asse del binario. 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 6, 25 e 55 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 lungo l'asse X, Y e Z alle diverse distanze dal binario così da individuare la legge di propagazione in funzione del tipo di terreno.

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 distintamente per la tratta di nuova realizzazione (LN) per quella attuale (LS) e per quelle in affiancamento opportunamente considerando il diverso numero di transiti sulla base del modello di esercizio individuato sia per lo scenario di fase 1 che di fase 2.

Per quanto riguarda invece le tratte in galleria della linea di nuova realizzazione, la metodologia utilizzata si basa su un modello analitico a partire da un valore emissivo e da una legge di propagazione teorica funzione della tipologia di sorgente emissiva (lineare in sotterranea) e delle caratteristiche del terreno (velocità di propagazione delle onde, densità, fattore di perdita, etc.). In questo caso si è fatto riferimento ad un livello di accelerazione rappresentativo dell'emissione vibrazionale di un transito ferroviario di un convoglio ad 1 metro di distanza dal binario determinato a partire dai valori sperimentali derivanti dall'analisi dei dati misurati in situ. Come ulteriore fattore cautelativo è stato applicato un fattore correttivo in funzione della velocità di transito riferita al treno

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO (LOTTO 4B) STUDIO VIBRAZIONALE					
	STUDIO VIBRAZIONALE Relazione	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. A

più critico, ovvero la tipologia IC con una velocità di percorrenza di 200 km/h, seppur questa minoritaria rispetto all'intero modello di esercizio.

Applicando i suddetti modelli previsionali sono state determinate le distanze dall'asse del binario alle quali si raggiungono i livelli di accelerazione indicati dalla UNI 9614:1990, ovvero 77 dB nel periodo diurno e 74 dB in quello notturno.

Dalle analisi territoriali e da quanto individuato nel censimento dei ricettori 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 secondo sia il modello di esercizio previsto alla fase 1 sia quello alla fase 2. Tutti i ricettori a destinazione abitativa risultano essere soggetti a livelli di accelerazione inferiori a quelli indicati dalla norma UNI 9614:1990 per la valutazione del disturbo da vibrazioni. Ne consegue come per quanto concerne il tema del disturbo da vibrazioni non siano necessari interventi di mitigazione finalizzati alla riduzione delle emissioni indotte dal transito dei convogli ferroviari lungo la linea ferroviaria oggetto di studio.