

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**U.O. ARCHITETTURA, AMBIENTE E TERRITORIO**  
**S.O. AMBIENTE ED ENERGY SAVING**

**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA**

**LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA**  
**NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA**  
**LOTTO 1 BATTIPAGLIA - PRAIA**  
**LOTTO 1B ROMAGNANO - BUONABITACOLO**  
**STUDIO VIBRAZIONALE**

Relazione Generale

SCALA:

-

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

RC2A B1 R 22 RG IM0004 002 C

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	F. Tamburini	Dicembre 2021	R. Azzarito	Dicembre 2021	I. D'Amore	Dicembre 2021	C. Ercolani Aprile 2024
B	Emissione esecutiva	F. Tamburini	Luglio 2023	R. Azzarito	Luglio 2023	I. D'Amore	Luglio 2023	<b>PER EMISSIONE ITALFERR S.p.A.</b> Dott.ssa Carolina Ercolani S.O. Ambiente ed Energy Saving
C	Emissione a seguito richieste di integrazione MASE	F. Tamburini	Aprile 2024	R. Azzarito	Aprile 2024	N. Manfuso	Aprile 2024	
				A. Corvaja				

1	PREMESSA .....	4
2	RIFERIMENTI LEGISLATIVI .....	6
2.1	ISO 2631 “VALUTAZIONE SULL’ESPOSIZIONE DEL CORPO UMANO ALLE VIBRAZIONI” .....	7
2.2	UNI 9614 “MISURA DELLE VIBRAZIONI NEGLI EDIFICI E CRITERI DI VALUTAZIONE DEL DISTURBO” .....	8
2.3	UNI 9916 “CRITERI DI MISURA E VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DELLE VIBRAZIONI SUGLI EDIFICI” .....	18
3	VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI IN FASE DI ESERCIZIO DELLA LINEA FERROVIARIA .....	21
3.1	CONTESTO GEOLOGICO .....	21
3.2	PROPAGAZIONE DELLE ONDE VIBRAZIONALI: MODELLO PREVISIONALE .....	31
3.2.1	<i>Attenuazione geometrica</i> .....	33
3.2.2	<i>Velocità di transito</i> .....	33
3.2.3	<i>Caratterizzazione della sorgente</i> .....	34
3.2.4	<i>Propagazione delle onde nei terreni</i> .....	34
3.2.5	<i>Propagazione delle onde nelle strutture edilizie</i> .....	36
3.2.6	<i>Incertezza del modello</i> .....	41
3.2.7	<i>Rumore trasmesso per via solida dalle strutture</i> .....	41
3.3	INDAGINI VIBROMETRICHE, TARATURA E VALIDAZIONE DEL MODELLO .....	42
3.3.1	<i>Caratterizzazione emissione sorgente ferroviaria</i> .....	43
3.3.1.1	<i>Sezione 1 - Galleria</i> .....	43
3.3.1.2	<i>Sezione 2 - Viadotto</i> .....	54
3.3.1.3	<i>Sezione 3 - Rilevato</i> .....	64
3.4	MODELLO DI ESERCIZIO FERROVIARIO .....	71
3.4.1	<i>Modello di esercizio di Progetto</i> .....	71
3.5	FUNZIONE DI PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI PER LO STATO PROGETTO .....	71
3.5.1	<i>Valori attesi per i tratti allo scoperto in Rilevato</i> .....	72

3.5.2	Valori attesi per i tratti al coperto in Galleria .....	76
3.5.3	Valori attesi per i tratti allo scoperto in Viadotto .....	81
4	PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO .....	85
4.1	CENSIMENTO DEI RICETTORI .....	85
4.2	VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI AI RICETTORI .....	87
4.3	TECNICHE DI MITIGAZIONE DELLE VIBRAZIONI.....	89
5	CONCLUSIONI.....	90

## 1 PREMESSA

Il presente documento contiene i risultati dello studio relativo all'impatto vibrazionale prodotto dall'esercizio della **Linea Ferroviaria Salerno – Reggio Calabria: Nuova linea AV Salerno – Reggio Calabria – Lotto 1B, della tratta Battipaglia-Praia, denominato “Romagnano – Buonabitacolo”**.

Il lavoro tiene conto delle indicazioni delle norme tecniche, emanate in sede nazionale ed internazionale, basandosi anche sui risultati della campagna di rilievi vibrometrici appositamente eseguita nell'ambito della Progettazione in oggetto e a cui si fa riferimento per i dettagli del caso.

L'analisi dei livelli vibrometrici alla sorgente, lungo la linea di propagazione ed agli eventuali ricettori prossimi alla linea ferroviaria è effettuata distinguendo le tipologie di convogli effettivamente transitanti sulla ferrovia, le condizioni geologiche che costituiscono il terreno tra ferrovia e ricettori e la tipologia di ricettore in termini di struttura e numero di piani. Il valore complessivo di accelerazione, che tiene conto del modello di esercizio all'orizzonte temporale di progetto, è confrontato con i limiti indicati dalla norma tecnica per il periodo diurno (06-22) e il periodo notturno (22-06).

L'iter metodologico seguito nel rispetto del “*Manuale di Progettazione delle Opere Civili di RFI (cod. RFI RFIDTCSIAMMAIFS001D di dicembre 2020)*” e l'integrazione al riferimento alla norma UNI 9614 versione aggiornata del 2017 può essere schematizzato secondo le fasi di lavoro di seguito riportate.

Individuazione dei valori limite del vettore sorgente secondo la UNI 9614:2017 “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo”.

Caratterizzazione ante operam. In questa fase dello studio è stato analizzato il territorio allo stato attuale (situazione ante operam) identificando gli ingombri e le volumetrie di tutti i fabbricati presenti con particolare riguardo alla destinazione d'uso e all'altezza dei ricettori potenzialmente impattati e ricadenti nella fascia di pertinenza acustica ferroviaria.

Livelli delle vibrazioni post operam. Con l'ausilio del modello di simulazione, nel quale è determinata la funzione di trasferimento delle vibrazioni, si è proceduto alla valutazione dei livelli vibrazionali con la realizzazione del progetto in esame. Gli algoritmi di calcolo scelti per valutare la propagazione dell'onda vibratoria permettono la definizione della funzione di trasferimento in base alla regressione di dati sperimentali ottenuti da apposite indagini in campo. Tale funzione è quindi opportunamente tarata sui dati ottenuti da indagini sperimentali ed impiegata per la predizione dei futuri livelli di vibrazioni. I risultati del modello di simulazione sono stati quindi messi a confronto con i limiti per le vibrazioni proposti dalla UNI 9614:2017 in relazione alla destinazione d'uso del ricettore.

Metodi per il contenimento delle vibrazioni. In questa parte dello studio, eventualmente presente nel caso di riscontro di predizioni oltre il limite, sono state descritte le tipologie di intervento da adottare indicandone i requisiti di smorzamento minimi.

Individuazione degli interventi di mitigazione. Nell'eventualità di riscontro dalla predizione dei livelli vibrazionali oltre i limiti, l'obiettivo degli interventi sarà di abbattere l'impatto relativo mediante l'inserimento di sistemi di mitigazione quali per esempio tappetini antivibranti, realizzazione di discontinuità nel mezzo propagante o accorgimenti tecnici sull'armamento.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>LOTTO 1 BATTIPAGLIA - PRAIA</b> <b>LOTTO 1B ROMAGNANO - BUONABITACOLO</b> <b>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</b>					
	<b>Relazione Generale</b>	COMMESSA RC2A	LOTTO B1 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. C

## 2 RIFERIMENTI LEGISLATIVI

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.

La caratterizzazione delle emissioni di vibrazioni da parte di veicoli non è soggetta alle stringenti normative e disposizioni legislative che normano invece l'emissione del rumore e sebbene le vibrazioni trasmesse agli edifici non siano state argomento di legiferazione da parte dello Stato italiano è tuttavia universalmente riconosciuta la competenza in materia da parte dell'UNI, 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, le norme di interesse per il presente studio di impatto sono:

- Norma UNI 9614:1990 “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo”;
- Norma UNI 9614:2017 “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo”;
- Norma UNI 9916:2004 “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici”.

Nella UNI 9614:1990 è definito il metodo di misura delle vibrazioni di livello costante 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 UNI 9614:1990 ha subito una revisione nel 2017. La UNI 9614:2017 imposta un approccio profondamente diverso nella modalità di valutazione dei disturbi da vibrazione. Per tale motivo, considerando il nuovo approccio proposto dalla revisione del 2017, la valutazione del modello di propagazione sarà eseguita in riferimento alla UNI 9614:2017.

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 per permettere la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica.

Vi sono, inoltre, 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.

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 prima nel D.P.C.M. 27/12/1988 e a seguito della sua abrogazione nel 2017, dall’ Allegato VII alla Parte Seconda del D.Lgs. n. 152/2006 che lo ha sostituito. Ad essa, seppur con alcune non trascurabili differenze, fa riferimento la norma UNI 9614:2017 “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo”.

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

## 2.1 ISO 2631 “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 integrante della norma) fornisce informazioni sui criteri di valutazione della risposta soggettiva alle vibrazioni; in pratica sono riportati i fattori di moltiplicazione da applicare alle curve base delle accelerazioni e delle velocità al variare del periodo di riferimento (giorno e notte), del tipo di vibrazione (vibrazioni continue o intermittenti, vibrazioni transitorie) e del tipo di insediamento

(ospedali, laboratori di precisione, residenze, uffici, industrie). Le vibrazioni devono essere misurate nel punto di ingresso nel corpo umano e deve essere rilevato il valore di accelerazione r.m.s. perpendicolarmente alla superficie vibrante. Nel caso di edifici residenziali in cui non è facilmente definibile un asse specifico di vibrazione, in quanto lo stesso edificio può essere usato da persone in piedi o coricate in diverse ore del giorno, la norma presenta una curva limite che tiene conto delle condizioni più sfavorevoli combinate in tre assi.

## 2.2 UNI 9614 “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo”

La UNI 9614:1990 “Vibrazioni - Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo” considera i diversi tipi di sollecitazione vibratoria: livelli costanti, non costanti, impulsivi. La norma definisce metodologia di misura e analisi del segnale al fine di quantificare il disturbo da vibrazioni verso le persone. La vibrazione viene espressa attraverso il concetto di accelerazione:

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

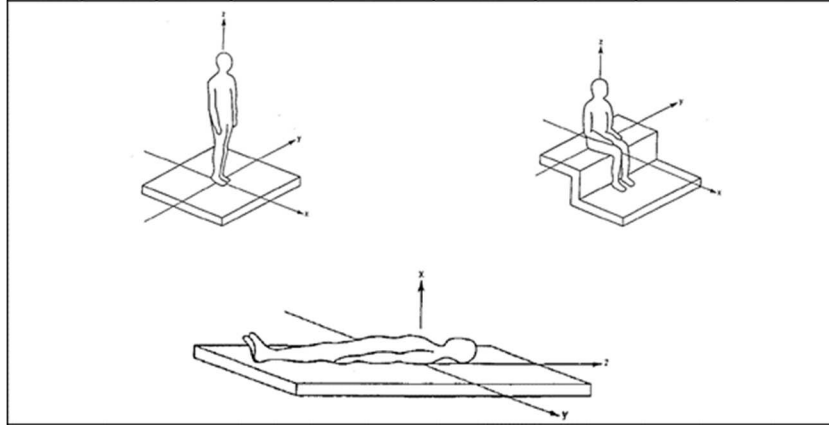
o del suo equivalente livello di accelerazione (espressione in dB dell'accelerazione espressa in m/s<sup>2</sup>):

$$L_{acc} = 20 \cdot \lg \left[ \frac{a}{a_0} \right] \quad a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$$

Nella definizione di accelerazione ponderata aw prevista dalla norma (che prevede una pesatura in frequenza in funzione della direzione della vibrazione) si fa riferimento al seguente schema.

Frequenza [Hz]			Ponderazione per le Accelerazioni [dB]			Ponderazione per le Velocità [dB]		
centrale	Estremo inferiore	Estremo superiore	Postura Longitudinale (asse z)	Postura Trasversale (asse x-y)	Postura non nota o Variabile	Postura Longitudinale (asse z)	Postura Trasversale (asse x-y)	Postura non nota o Variabile
1.00	0.89	1.12	-6.0	0.0	0.0	-24.0	-6.0	-15.0
1.25	1.12	1.41	-5.0	0.0	0.0	-21.0	-4.0	-13.0
1.60	1.41	1.78	-4.0	0.0	0.0	-18.0	-2.0	-11.0
2.00	1.78	2.24	-3.0	0.0	0.0	-15.0	0.0	-9.0
2.50	2.24	2.82	-2.0	-2.0	-0.5	-12.0	0.0	-7.5
3.15	2.82	3.55	-1.0	-4.0	-1.0	-9.0	0.0	-6.0
4.00	3.55	4.47	0.0	-6.0	-1.5	-6.0	0.0	-4.5
5.00	4.47	5.62	0.0	-8.0	-2.0	-4.0	0.0	-3.0
6.30	5.62	7.08	0.0	-10.0	-2.5	-2.0	0.0	-1.5
8.00	7.08	8.91	0.0	-12.0	-3.0	0.0	0.0	0.0
10.00	8.91	11.22	-2.0	-14.0	-5.0	0.0	0.0	0.0
12.50	11.22	14.13	-4.0	-16.0	-7.0	0.0	0.0	0.0
16.00	14.13	17.78	-6.0	-18.0	-9.0	0.0	0.0	0.0
20.00	17.78	22.39	-8.0	-20.0	-11.0	0.0	0.0	0.0
25.00	22.39	28.18	-10.0	-22.0	-13.0	0.0	0.0	0.0
31.50	28.18	35.48	-12.0	-24.0	-15.0	0.0	0.0	0.0
40.00	35.48	44.67	-14.0	-26.0	-17.0	0.0	0.0	0.0
50.00	44.67	56.23	-16.0	-28.0	-19.0	0.0	0.0	0.0
63.00	56.24	70.79	-18.0	-30.0	-21.0	0.0	0.0	0.0
80.00	70.80	89.12	-20.0	-32.0	-23.0	0.0	0.0	0.0





I valori limite sono differenziati per tipologia insediativa, per tipo di segnale (durata, caratteristiche) e per asse di sollecitazione. Per valori di sollecitazione vibratoria costante e non costante (dove per quest'ultima viene richiesta un'integrazione dei valori misurati), i valori limite sono riportati nella seguente tabella.

Classe	Destinazione d'uso del territorio	Livello $L_{eff}$ [dB] (°)			Accelerazione $A_{eff}$ [mm/s <sup>2</sup> ]			Velocità $V_{eff}$ [μm/s]		
		L (z)	T (x-y)	V (x-y-z)	L (z)	T (x-y)	V (x-y-z)	L (z)	T (x-y)	V (x-y-z)
I	Aree critiche (1)	74	71	71	5,0	3,6	3,6	100	280	100
II	Abitazioni (notte)	77	74	74	7,0	5,0	5,0	140	400	140
III	Abitazioni (giorno)	80	77	77	10,0	7,2	7,2	200	560	200
IV	Uffici	86	83	83	20,0	14,4	14,4	400	1.100	400
V	Fabbriche	92	89	89	40,0	28,8	28,8	800	2.200	800

L componente longitudinale (riferita alla spina dorsale dell'uomo).....(Asse z)  
T componente trasversale (riferita alla spina dorsale dell'uomo) .....(Assi x-y)  
V nel caso di postura variabile o non nota .....(Assi x-y-z)  
(°) 0 dB ≅ 1 μm/s<sup>2</sup> (10<sup>-6</sup> m/s<sup>2</sup>)

(1) Per aree critiche si intendono edifici particolarmente sensibili alle vibrazioni, quali ad es. laboratori metrologici, fabbricati industriali contenenti apparecchiature sensibili alle vibrazioni (microscopi elettronici...).

La UNI 9614:1990 definisce tre tipologie di segnali vibratorii:

- vibrazioni di livello costante;
- vibrazioni di livello non costante;
- vibrazioni impulsive.

Il segnale vibratorio prodotto dalle vibrazioni stradali può essere considerato come una vibrazione di livello non costante e dunque per tale tipologia di segnale la valutazione deve avvenire su un "intervallo di tempo rappresentativo" dell'evento (app. A.2 norma UNI 9614).

Su tale intervallo è possibile effettuare due tipi di valutazioni: nel caso in cui si scelga un approccio maggiormente cautelativo si può operare sul massimo valore raggiunto durante l'evento del transito, mentre in alternativa si può lavorare sul concetto di media energetica sulla durata dell'evento.

In generale, la valutazione delle vibrazioni negli studi, è scelto di eseguire le valutazioni sul valore medio del valore efficace (RMS) della vibrazione su un intervallo equivalente alla durata dell'evento di transito.

Per quanto riguarda la direzione del rilievo la norma UNI 9614 prescrive di eseguire i rilievi "lungo i tre assi ortogonali o secondo l'asse lungo il quale le vibrazioni sono più elevate". Negli studi è scelto di considerare la seconda ipotesi, e di applicare la ponderazione asse Z all'asse verticale e la ponderazione X-Y per gli assi orizzontali. I limiti applicabili saranno pertanto:

Direzione Asse	Soglia di percezione Law (dB)	Limite di accettabilità per abitazioni Law (dB)	Limite di accettabilità per uffici Law (dB)
Asse Z	74	77	86
Assi X-Y	71	74	83

In riferimento alla UNI 9614:2017, essendo essa presa a riferimento nello studio, si riporta di seguito la descrizione dettagliata della norma.

Nel settembre 2017, dopo una lunga fase preparatoria, è stato emanato l'aggiornamento della norma UNI 9614:1990. L'aggiornamento si è reso necessario per mettere a punto un approccio più moderno alla valutazione del disturbo da vibrazioni e per tenere conto dei progressi delle tecniche di misura e della normativa internazionale vigente.

La norma, come già illustrato, riguarda il metodo di misurazione delle vibrazioni immesse negli edifici ad opera di sorgenti interne o esterne agli edifici ed i criteri di valutazione del disturbo delle persone all'interno degli edifici stessi. La nuova versione della norma modifica in modo sostanziale la vecchia, introducendo un approccio innovativo per le modalità di valutazione dei disturbi da vibrazioni, facendo riferimento alla norma ISO 2631.2:2003, per i metodi di misura e valutazione, ed alla norma norvegese NS 8176.E.

La norma è applicabile a tutti i fenomeni che possono originare vibrazioni negli edifici, come, ad esempio, traffico su gomma o su rotaia, attività industriali o di specifici macchinari, attività di cantiere, esplosioni, ecc.; non è invece applicabile a vibrazioni derivanti da fenomeni sismici, alla valutazione di danni strutturali, architettonici o "cosmetici" agli edifici, per la quale esistono altre norme di riferimento, all'esame di problematiche connesse all'igiene sul lavoro, o alle attività di manutenzione preventiva/predittiva di macchinari o di influenza su strumenti

particolarmente sensibili. Non si applica inoltre a casi di frequenze vibrazionali inferiori al terzo di banda d'ottava centrato a 1 Hz.

Anzitutto la nuova norma 9614:2017 distingue i tipi di sorgenti in base a:

- Posizione: interna o esterna agli edifici
- Funzione: per sorgenti legate ad “attività essenziali” di pubblico servizio, per le quali un’eventuale disattivazione potrebbe generare un’interruzione di pubblico servizio con danni a persone, cose o attività, possibili pericoli o problemi di ordine pubblico, ecc. (ospedali, gasdotti, elettrodotti, acquedotti, ecc.); per sorgenti legate ad “attività non interrompibili”, per le quali non è possibile, a meno di interventi di manutenzione programmata o straordinaria, interrompere in tempi rapidi l’attività senza produrre danni o pericoli o alterazioni di prodotto (sorgenti industriali e/o a ciclo continuo, impianti di produzione/distribuzione di energia, sistemi di trasporto pubblico); per sorgenti “di altra natura”
- Caratteristiche di durata delle vibrazioni prodotte: per sorgenti continue o semi-continue (impianti industriali); per sorgenti intermittenti presenti per gran parte della giornata (strade, metropolitane, ferrovie); per sorgenti intermittenti presenti per una parte limitata della giornata (ascensori interni a un edificio); per sorgenti temporanee presenti per gran parte della giornata (cantieri); per sorgenti temporanee presenti per una parte limitata del giorno.

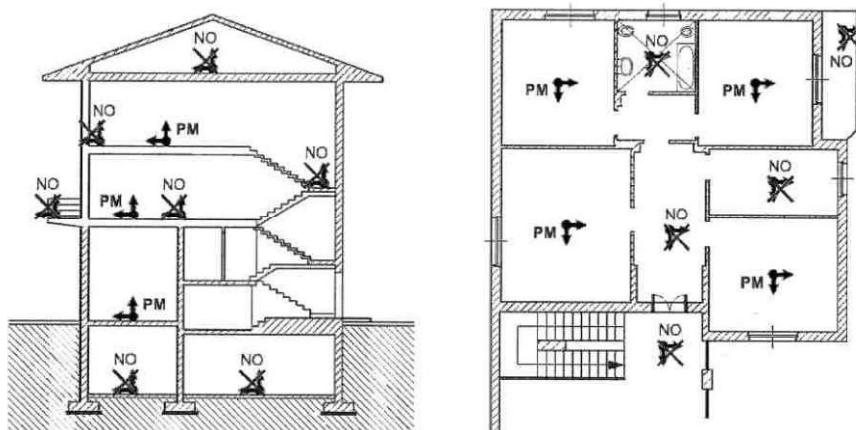
La classificazione di cui sopra viene proposta come descrittore univoco per l’identificazione dei fenomeni.

Le misure devono essere eseguite dopo un’analisi accurata dei fenomeni osservati, condotta sulla base degli aspetti legati alla tipologia di sorgente e di edificio, ed alle posizioni dei recettori e relativi tempi di permanenza.

La grandezza cinematica di riferimento rappresentativa del disturbo è individuata nell’accelerazione assoluta, che necessita di una misura diretta per mezzo di sensori accelerometrici, con misura simultanea sui tre assi ortogonali di riferimento per la struttura dell’edificio o del corpo umano (per convenzione: asse Z verticale).

Le postazioni di misura vanno individuate sulla base delle reali condizioni di utilizzo degli ambienti da parte degli abitanti, escludendo quindi eventuali ambienti di servizio (ripostigli, servizi igienici, cantine, solai, corridoi, giardini, vie di accesso, balconi/terrazzi, scale, pianerottoli e ambienti non abitabili secondo le vigenti normative indipendentemente dal loro reale uso). Le misure per la valutazione del disturbo alla persona vanno eseguite, in generale, sui pavimenti o, in subordine, su elementi strutturali che possono essere a diretto contatto con il corpo umano durante la normale attività all’interno dell’ambiente o su superfici di appoggio per mobili utilizzati per il riposo, ma non su soffitti, controsoffitti, mensole, vetrate, suppellettili, mobili, letti e arredi in generale. Vanno anche evitate posizioni di misura su superfici a scarsa aderenza con le strutture (piastrelle non aderenti al massetto), morbide e/o cedevoli (tappeti, moquette, ecc.) o per le quali l’ampiezza delle vibrazioni può derivare anche da cattivo stato di manutenzione. Ovviamente i punti di misura devono essere individuati nei punti ove si rileva il più

elevato dei valori efficaci di accelerazione ponderata  $a_w(t)$ , ma lontano da eventuali punti singolari. La seguente mostra alcune possibili individuazioni di punti di misura adeguati o non adeguati alle valutazioni oggetto della norma in esame.



**Figura 2-1 Individuazione corretta e non corretta dei punti di misura**

La durata complessiva delle misure dipende dal numero di eventi necessario ad assicurare una ragionevole accuratezza statistica delle misure, tenendo conto sia della variabilità della sorgente che della natura dell'ambiente di misura. Se l'esposizione è prodotta da fenomeni di diverso tipo presenti in diversi periodi, è necessario procedere ad un'analisi separata per ciascun periodo. L'appendice A della norma fornisce criteri generali per l'individuazione degli eventi da prendere in considerazione nel caso di fenomeni connessi a traffico tramviario o stradale, attività di cantiere, sorgenti industriali, attività umane dirette e vibrazioni stazionarie ed ergodiche. Per le misure, resta comunque fondamentale la verifica dell'effettiva ed esaustiva rappresentatività della situazione in esame.

La norma fornisce comunque indicazioni generali sul numero minimo consigliato di eventi da prendere in considerazione per i singoli casi:

- per fenomeni caratterizzati da un elevato numero di eventi distinti: almeno 15 eventi
- per fenomeni generati da attività umane dirette con eventi distinguibili: almeno 25 eventi
- per fenomeni stazionari, ergodici o assimilabili che non danno luogo ad eventi distinti (attività industriali o attività umane dirette con eventi non facilmente distinguibili): almeno 25 eventi
- per fenomeni caratterizzati da un ridotto numero di eventi si possono eseguire misurazioni anche in giorni diversi per acquisire complessivamente i segnali relativi ad almeno 5 eventi
- gli eventi molto rari (indicativamente con occorrenza inferiore a un evento ogni due settimane) sono considerati "non disturbanti" ai fini della UNI 9614:2017, in virtù della loro scarsa incidenza temporale

Per la determinazione del presunto disturbo vibrazionale generato da una specifica sorgente devono essere misurate sia le vibrazioni immesse che quelle residue. Le vibrazioni residue vanno misurate nello stesso punto e con le stesse modalità e criteri utilizzati per le vibrazioni immesse, considerando ricomprese nella componente residua le vibrazioni eventualmente rilevate in ambiente lavorativo e connesse all'attività produttiva o agli impianti al suo servizio.

Nel caso di sorgenti continue classificabili come attività essenziali di pubblico servizio, non è ovviamente possibile la misura delle vibrazioni residue, rendendo accettabile la misura delle sole vibrazioni immesse, ma mantenendo la possibilità di eseguire rilievi di vibrazioni residue in occasione di fermi per manutenzioni programmate o nel corso di fasi di ridotta attività, al fine di ottenere almeno una stima della componente vibrazionale residua. Per le attività non interrompibili, ma non essenziali, la misura delle vibrazioni residue è invece richiesta mediante una disattivazione programmata delle sorgenti, previa una valutazione preliminare cautelativa della significatività delle vibrazioni residue stesse e del loro peso rispetto alle vibrazioni immesse. Per sorgenti semi-continue, intermittenti o temporanee la misura delle vibrazioni residue è invece obbligatoria.

La strumentazione da utilizzare per la valutazione del disturbo da vibrazioni deve permettere, oltre che l'acquisizione e la registrazione del segnale accelerometrico, anche l'elaborazione in linea dei dati. È accettato anche l'uso di sistemi di acquisizione dati con memorizzazione digitale della storia temporale accelerometrica con successiva post elaborazione off-line mediante specifico software, dandone esplicita indicazione, rispondente comunque alle caratteristiche di analisi richieste dalla UNI EN ISO 8041-1.

Le caratteristiche metrologiche della catena di misura (curva di risposta in frequenza, dinamica del sistema di acquisizione, rumore di fondo, filtri "band limiting", ponderazione  $W_m$ , ecc.) devono essere conformi alla UNI EN ISO 8041-1.

In particolare, si devono rispettare i seguenti requisiti:

- sensibilità nominale non inferiore a  $10\text{mV}/(\text{m/s}^2)$
- risposta in frequenza della catena di misura, comprensiva dell'acquisizione, lineare con tolleranza  $\pm 5\%$  da 0.5 Hz a 250 Hz
- acquisizione digitale con frequenza di campionamento non minore di 1500 Hz, presenza di filtro anti-aliasing con frequenza non minore di 600 Hz, risoluzione preferenziale di 24 bit e minima di 16 bit
- valore efficace del rumore strumentale, dovuto a fenomeni casuali e non dipendenti né dalle vibrazioni immesse né da quelle residue, almeno cinque volte inferiore al minimo valore efficace dei segnali da misurare

Il montaggio degli accelerometri deve essere tale da garantire la trasmissione rigida del moto dal sistema vibrante all'accelerometro almeno della banda 0-500 Hz e deve essere eseguito facendo riferimento alla norma UNI ISO

5348 o secondo le indicazioni fornite dal produttore del sensore. Le modalità di installazione devono essere riportate nel rapporto di misura e devono essere scelte in relazione alle condizioni dei piani di posa, prevedendo eventualmente l'utilizzo, anche contemporaneo, di inserti/tasselli (meccanici o chimici) inseriti nel piano di posa, collaggi rigidi (mastici, resine, cera d'api), magneti, collegamenti bullonati o masse appoggiate isostaticamente sulle superfici alle quali è vincolato l'accelerometro (configurazione non concessa per superfici morbide o irregolari). Il corretto funzionamento della catena di misura deve essere verificato prima e dopo ogni misura mediante apposito calibratore a norma UNI EN ISO 8041-1; sono ammessi calibratori a frequenza fissa pari a 1000 rad/s ed ampiezza di 10m/s<sup>2</sup>. Ogni tre anni l'intera catena di misura deve essere sottoposta a verifica di taratura. La strumentazione di misura deve infine garantire l'acquisizione del segnale con riferimento alle specifiche di cui al punto 6 della norma UNI 11568:2015.

Per l'elaborazione delle misure ed il calcolo dei parametri del disturbo, la norma UNI 9614:2017 suggerisce un metodo sequenziale valido per tutti i tipi di sorgente e adeguato a coprire sia fenomeni di media e breve durata, sia fenomeni impulsivi caratterizzati da un fattore di cresta molto elevato.

L'elaborazione del segnale corrispondente ad ogni singolo evento monitorato comporta i seguenti passaggi:

1. filtraggio con filtro passa banda e con filtro di ponderazione: l'accelerazione rilevata sui tre assi  $a_x(t)$ ,  $a_y(t)$  e  $a_z(t)$  viene preliminarmente filtrata con un filtro passa banda ("band limiting"), con specifiche funzioni di trasferimento (§ punto 8.1.1 della norma), al fine di selezionare le frequenze significative per la risposta del corpo umano al disturbo. Successivamente si applica un filtro di ponderazione in frequenza che utilizza la curva  $W_m$  definita dalla ISO 2631-2, anch'esso con una specifica funzione di trasferimento (§ punto 8.1.2 della norma). Al termine del procedimento di filtraggio si ottiene. Per il  $j$ -esimo asse, l'accelerazione ponderata  $a_{wj}(t)$
2. calcolo del valore efficace dell'accelerazione assiale ponderata: per l'intera storia temporale del segnale ponderato, viene calcolato, secondo quanto indicato dalla norma UNI EN ISO 8041-1:2017 al punto D.1, l'andamento nel tempo del valore efficace dell'accelerazione ponderata, in riferimento a ciascun asse cartesiano, e per un intervallo di integrazione  $T = 1$  s, secondo la seguente formulazione:

$$a_{w,rms,j}(t) = \left( \frac{1}{T} \times \int_{t-T}^t a_{w,j}^2(t) \times dt \right)$$

3. calcolo dell'accelerazione ponderata totale efficace: viene eseguito per combinazione (secondo UNI ISO 2631-1:1997, punto 6.5, con  $k_x=k_y=k_z=1$ ), istante per istante, a partire dalle tre accelerazioni assiali ponderate calcolate in precedenza secondo la seguente relazione:

$$a_w(t) = \sqrt{a_{w,rms,x}^2(t) + a_{w,rms,y}^2(t) + a_{w,rms,z}^2(t)}$$

Le precedenti tre fasi di calcolo sono riassunte nella seguente figura.

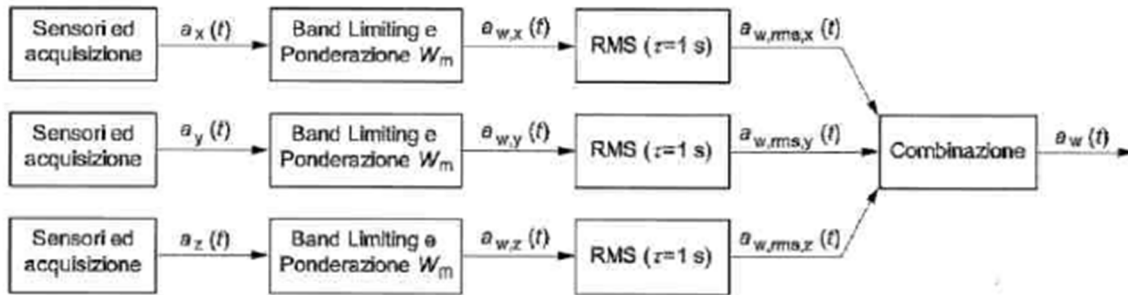


Figura 2-2 Schema di calcolo dell'accelerazione ponderata efficace secondo la UNI 9614:2017

Dall'accelerazione ponderata efficace  $a_w(t)$ , si possono poi ottenere le seguenti grandezze:

- a) massima accelerazione ponderata, definita come il massimo livello di accelerazione ponderata efficace all'interno del singolo evento  $j$ -esimo, ovvero:

$$a_{w,max,j} = \max(a_w(t))$$

- b) massima accelerazione statistica  $a_{w,95}$  data dalla seguente relazione:

$$a_{w,95} = \overline{a_{w,max}} + 1,8 \times \sigma$$

dove:

$\overline{a_{w,max}}$  è il valore medio della massima accelerazione ponderata calcolato come media aritmetica delle massime accelerazioni ponderate  $a_{w,max,j}$  con  $j$  che rappresenta gli eventi considerati, ovvero:

$$\overline{a_{w,max}} = \frac{\sum_{j=1}^N a_{w,max,j}}{N}$$

$\sigma$  è lo scarto tipo della distribuzione delle massime accelerazioni ponderate  $a_{w,max,j}$  calcolate mediante la seguente relazione:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (a_{w,max,j} - \overline{a_{w,max}})^2}{N - 1}}$$

Nel caso in cui non sia possibile misurare più di 5 eventi, non si ritiene attendibile  $a_{w,95}$  così ottenuto, ed esso deve quindi essere stimato mediante la più elevata delle massime accelerazioni ponderate  $a_{w,max,j}$  relative agli N eventi misurati.

Inoltre, è possibile determinare anche le vibrazioni associate ad una specifica sorgente ritenuta fonte di disturbo mediante l'accelerazione ponderata massima statistica della sorgente,  $V_{sor}$ , da calcolare a partire dall'accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni immesse,  $V_{imm}$ , e dall'accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni residue,  $V_{res}$ , secondo la seguente relazione:

$$V_{sor} = \sqrt{V_{imm}^2 + V_{res}^2}$$

Per la determinazione del vero valore del parametro  $a_{w,95}$  si utilizza un procedimento di misure ripetute di vibrazioni su edifici, misure, per loro stessa natura, soggette, in generale, ad indeterminazione statistica derivante da incertezza strumentale, da quella relativa alla scelta delle postazioni di misura e da quella legata alla natura ed alle caratteristiche di variabilità del fenomeno in esame; dunque, anche  $a_{w,95}$  sarà un parametro soggetto ad indeterminazione.

L'incertezza strumentale e quella legata alla scelta delle posizioni di misura sono ben caratterizzate nella UNI 9614:2017 e, per questo, sono, in generale, meno importanti dell'indeterminazione connessa alle specifiche caratteristiche del fenomeno vibratorio in esame. Di conseguenza le incertezze globali delle determinazioni sono influenzate principalmente dall'incertezza sulle caratteristiche del fenomeno e quindi dalla natura della sorgente, dalle modalità di generazione e di rilascio di energia vibrazionale e dalla proprietà fisico-meccaniche del mezzo entro il quale si propaga il fenomeno vibratorio, proprietà eventualmente anche variabili nel tempo.

In generale è quindi pressoché impossibile fornire indicazioni quantitative sull'incertezza del fenomeno vibratorio ed è quindi necessario valutare la dispersione dei dati mediante induzione motivata o l'esecuzione di misure in periodo diversi.

Ovviamente una significativa riduzione dell'indeterminazione può essere ottenuta con l'incremento del numero di eventi analizzati anche oltre le indicazioni fornite, in generale, dalla UNI 9614:2017 (punto 6.3).

Una volta determinato il parametro descrittore della vibrazione di una sorgente,  $V_{sor}$ , è possibile confrontare i suoi valori con specifici limiti di disturbo caratteristici di diversi tipi di ambienti e di diversi periodi della giornata. Ad esempio, per ambienti ad uso abitativo, i limiti di riferimento massimi per la massima accelerazione ponderata della sorgente,  $V_{sor}$ , sono:

- periodo diurno: 7.2 mm/s<sup>2</sup>
- periodo notturno: 3.6 mm/s<sup>2</sup>



- periodo diurno di giornate festive:  $5.4 \text{ mm/s}^2$

Il seguente schema riepiloga i limiti di riferimento individuati dalla norma UNI 9614:2017 per particolari ambienti diversi da quello residenziale/abitativo.

- |  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| • ambienti di lavoro (1)               | $V_{\text{sor}} = 14 \text{ mm/s}^2$  |
| • ospedali, case di cura ed affini (2) | $V_{\text{sor}} = 2 \text{ mm/s}^2$   |
| • asili e case di riposo (3)           | $V_{\text{sor}} = 3,6 \text{ mm/s}^2$ |
| • scuole (4)                           | $V_{\text{sor}} = 5,4 \text{ mm/s}^2$ |

Note:

- (1) limiti indicati fermi restando gli obblighi derivanti dalla protezione dei lavoratori ex D.Lgs. 81/08 e s.m.i, e riferendosi a vibrazioni immesse da sorgenti esterne e non connesse alle attività (le vibrazioni connesse alle attività produttive fanno parte della componente residua  $V_{\text{res}}$ );
- (2) limiti validi indipendentemente dall'orario, per degenze ordinarie, e con misure effettuate al pavimento in corrispondenza del letto dei pazienti;
- (3) limiti validi anche in orario diurno, limitatamente ai periodi effettivamente utilizzati per il riposo diurno (prime ore del pomeriggio);
- (4) limiti validi per il periodo di effettivo utilizzo da parte degli allievi e limitatamente alle aule didattiche

Nel caso in cui le vibrazioni residue,  $V_{\text{res}}$ , avessero un valore maggiore del 50% di quelle immesse,  $V_{\text{imm}}$ , il disturbo prodotto dalle vibrazioni della sorgente,  $V_{\text{sor}}$ , può essere ritenuto trascurabile.

Di seguito la tabella di sintesi dei limiti previsti dalla UNI 9614:2017.

<b>Destinazione d'uso</b>	<b>Accelerazione Vettore <math>V_{\text{sorg}}</math> (<math>\text{m/s}^2</math>)</b>
Abitazioni (periodo notturno dalle 22:00 alle 6:00)	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Abitazioni (periodo diurno dalle 6:00 alle 22:00)	$7,2 \cdot 10^{-3}$
Abitazioni (periodo diurno festivo dalle 6:00 alle 22:00)	$5,4 \cdot 10^{-3}$
Luoghi di lavoro	$14 \cdot 10^{-3}$
Ospedali, case di cura e affini (indipendentemente dal periodo)	$2 \cdot 10^{-3}$
Asili e case di riposo (valido anche nel periodo diurno in caso sia previsto il riposo delle persone)	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Scuole (nel periodo di utilizzo degli allievi e limitatamente alle aule usate)	$5,4 \cdot 10^{-3}$

**Tab. 2.1 - Valori limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza per la UNI 9614:2017**

### 2.3 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 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).

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÷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.

In considerazione dei valori nettamente inferiori dei limiti previsti della norma UNI 9614:2017 rispetto a quelli della norma UNI 9614:2014, si considera nella presente valutazione, che il rispetto dei limiti della norma UNI 9614:2017 implichi il conseguente rispetto anche dei limiti della norma UNI 9916:2014.

### 3 VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI IN FASE DI ESERCIZIO DELLA LINEA FERROVIARIA

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.

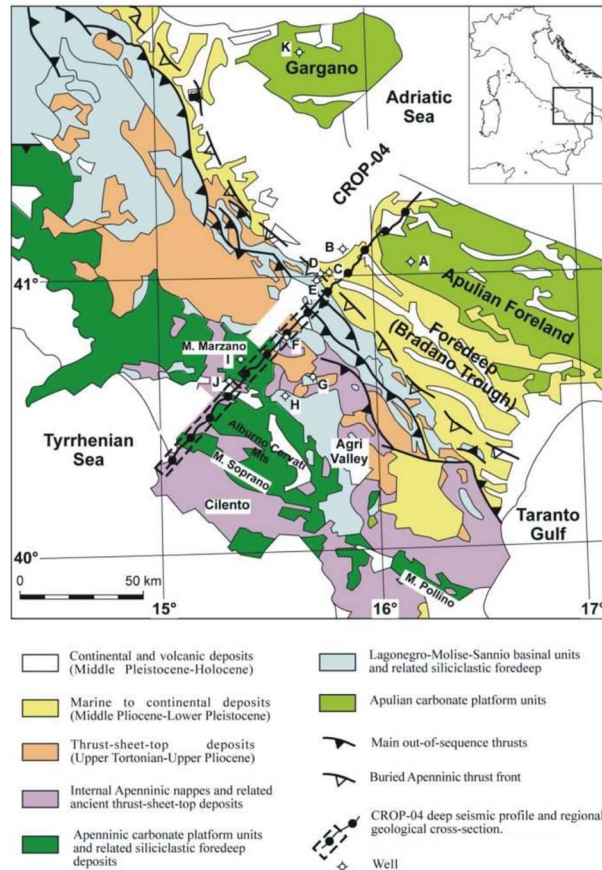
Le vibrazioni sono in grado di determinare effetti indesiderati sulla popolazione esposta e sugli edifici. Il disturbo sulle persone, classificato come "*annoyance*", dipende in misura variabile dall'intensità e frequenza dell'evento disturbante e dal tipo di attività svolta. Le vibrazioni possono causare danni agli edifici in alcune situazioni, o in presenza di caratteristiche di estrema suscettività strutturale o di elevati e prolungati livelli di sollecitazione dinamica. 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*.

Nel caso specifico il territorio interessato dal progetto è di tipo rurale, caratterizzato da un'alternanza di aree agricole/incolti, residenze sparse e strutture del produttivo industriale e artigianale. La tipologia edilizia è costituita per le residenze da fabbricati generalmente di 1, 2 o 3 piani in parte con struttura in muratura e in parte con struttura in c.a. I terreni affioranti interessati dal tracciato di progetto sono principalmente di tipo sciolto e presentano un comportamento abbastanza omogeneo in relazione al trasferimento di onde vibratorie.

Per quanto riguarda le sorgenti vibrazionali attualmente presenti si evidenzia l'attuale linea ferroviaria che si sviluppa parallelamente alla tratta ferroviaria in progetto.

#### 3.1 Contesto geologico

L'inquadramento geologico dell'area di interesse rientra nel contesto della fascia a thrust dell'Appennino meridionale, ovvero un segmento degli Appennini grossolanamente orientato in senso NO-SE, che appartiene al sistema orogenico circum-Mediterraneo. È collocata tra l'Appennino centrale a nord e l'Arco Calabro-Peloritano a sud, e limitata rispettivamente dalle linee tettoniche Ortona-Roccamonfina e Sanginetto (Bonardi et alii, 2009). Essa rappresenta una "thrust and fold belt" (catena a pieghe e falde) con vergenza orientale, collocata tra il bacino di retroarco tirrenico ad ovest e l'avampaese apulo-adriatico ad est, come evidenziato nella figura seguente



**Figura 3-1 - Carta geologica semplificata degli Appennini meridionali (da Scrocca, 2010, modificato).**

La catena si è originata a partire dal Miocene inferiore per la convergenza tettonica che ha portato alla subduzione verso ovest della litosfera oceanica, al di sotto del Blocco Sardo-Corso. L'assetto strutturale dell'Appennino meridionale è il risultato di eventi, compressivi, estensionali e trascorrenti, connessi all'arretramento flessurale della microplacca apulo-adriatica, a partire dal Tortoniano superiore

Nello specifico, nell'area in studio si incontra in maniera completa la struttura fondamentale dell'Appennino meridionale, in quanto sono rappresentate quasi tutte le unità tettoniche che costituiscono il sistema a pieghe e falde.

Dal basso verso l'alto strutturale queste unità sono:

1. l'Unità della Piattaforma Apula, diffusamente affiorante nel Gargano e in Puglia in posizione di avampaese; spessore tra 5000 e 7000 m (Scrocca, 2010);
2. le Unità Lagonegresi derivanti dalla deformazione di una successione di bacino triassico-cretacica, distinte in base alla posizione prossimale o distale (rispettivamente Unità Lagonegro II e Unità Lagonegro D);

affiorano nella zona di Lagonegro, tra Casalbuono e Nemoli, nella posizione strutturale più bassa all'interno della pila di falde alloctone, con spessore complessivo di 1 km (Casero et alii, 1988);

3. le Unità della Piattaforma Carbonatica, derivanti dalla deformazione di un dominio carbonatico di mare basso mesozoico, comunemente conosciuto come Piattaforma Appenninica; affiorano ubiquitariamente nell'area in studio e mostrano uno spessore complessivo fino a 5000 m (Scrocca, 2010);

4. le Unità Sicilidi, un insieme relativamente caotico di unità derivanti dalla deformazione di un'area interna impostata, insieme alle Unità Liguridi, su crosta oceanica; si incontrano nella metà meridionale dell'area in oggetto, a sud di Casalbuono;

5. seguono infine i depositi clastici plio-pleistocenici che costituiscono quasi sempre un velo esclusivamente superficiale e pellicolare di pochi metri; soltanto nel Bacino di Auletta, nel Vallo di Diano e nella Valle del Noce possono assumere spessore fino a decine di metri, con massimo di centinaia di metri nella depressione strutturale quaternaria del Val Le successioni dei gruppi 2-3-4 costituiscono oggi la struttura portante profonda della catena sud- Appenninica, strutturata in una serie di accavallamenti con vergenza verso est e nord-est. L'insieme di questa struttura a sua volta si è accavallato sul substrato costituito dalla Piattaforma Apula sepolta (gruppo 1), che si è flesso verso il basso per effetto del peso delle falde alloctone dell'Appennino.

Le successioni stratigrafiche plio-quaternarie (gruppo 5) costituiscono la copertura superficiale e sono poco o per nulla interessate dalla tettonica compressiva che ha generato la catena appenninica (successioni post-orogene). lo di Diano.

Gli schemi strutturali generali e le diverse Unità Tettoniche che caratterizzano l'area su cui si interesterà il Lotto in esame, si possono individuare nel *Foglio 504-Sala Consilina* e nel *Foglio 521-Lauria* e sono riferiti alla porzione mediana e alla porzione meridionale del tracciato; dalle citate carte (del Progetto CARG, Fogli della Carta Geologica d'Italia a scala 1:10000) e da rilievi in campo è stato costruito l'assetto litostratigrafico che verrà di seguito illustrato.

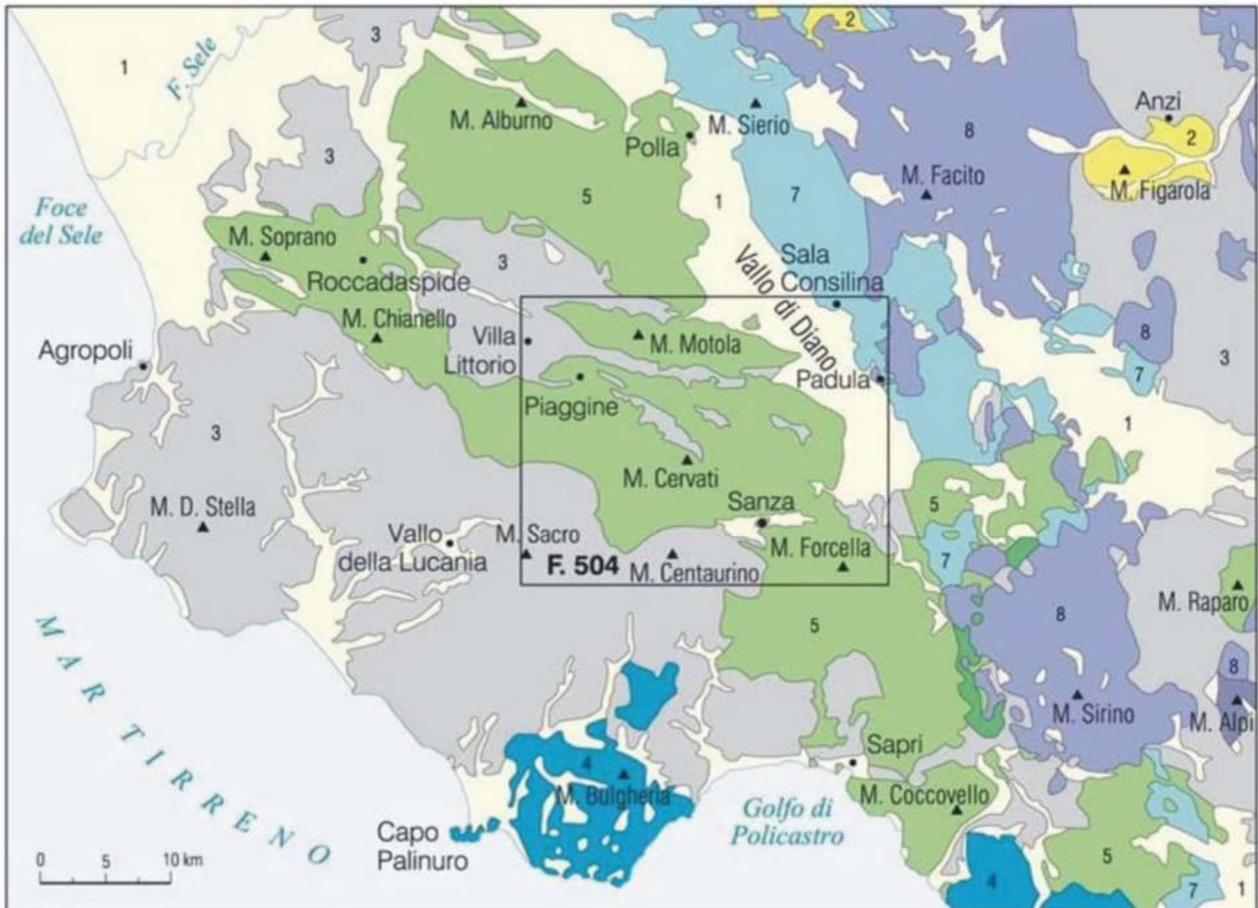
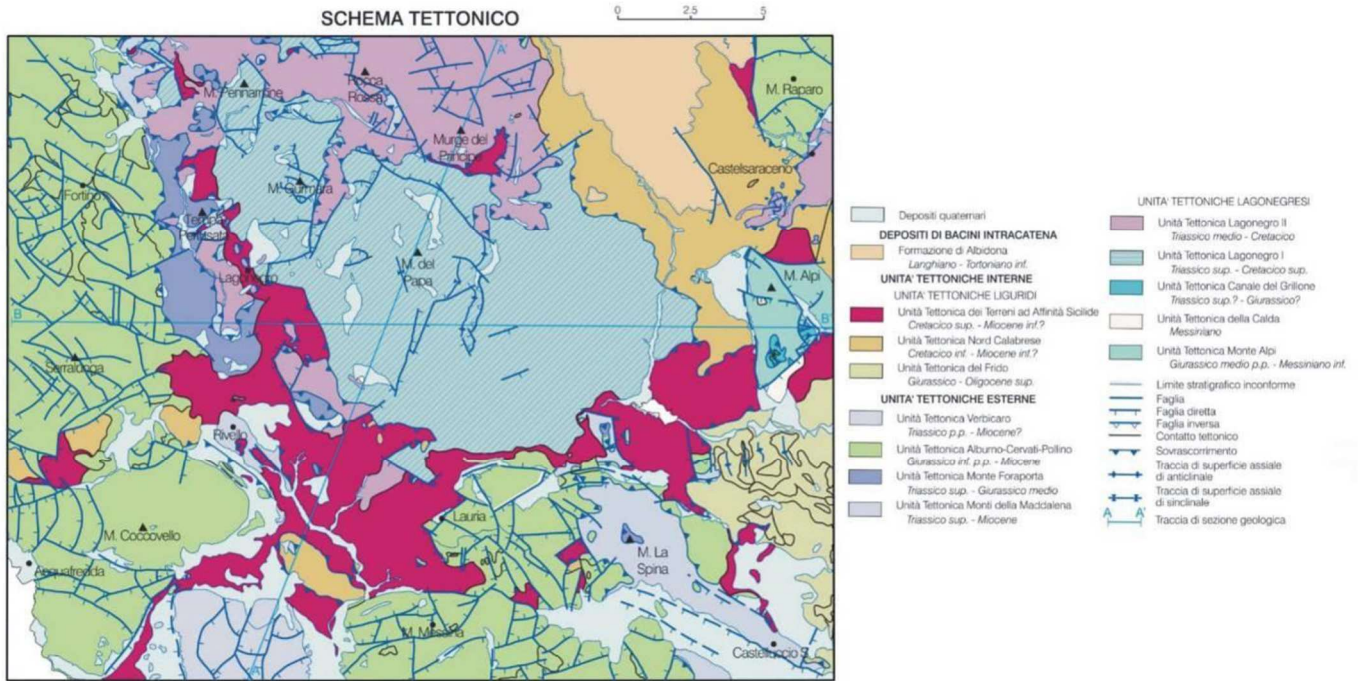


Figura 3-2 - Schema tettonico del Foglio 504 – Sala Consilina (ISPRA, 2010)





**Figura 3-3 – Schema tettonico del Foglio-521-Lauria (ISPRA, 2014, modificato)**

Alle differenti Unità Tettoniche appartengono le Formazioni affioranti che, data la considerevole lunghezza del tracciato, verranno citate di seguito nell'ordine in cui vengono intercettate dalla linea di progetto, in base alle progressive chilometriche, da considerarsi indicative: verrà, pertanto, sintetizzato il modello geologico di riferimento del tracciato, in relazione a quanto riportato nel profilo geologico generale, seguendo una suddivisione per tratte omogenee – caratterizzate da condizioni geologiche omogenee. Sarà specificato, come maggior dettaglio di valutazione, in quali tratte è prevista l'imbocco e la realizzazione di eventuali gallerie in progetto.

## **LOTTO 1B**

### **Pk 0+00 ÷ 1+400:**

Depositi appartenenti alle facies fine e grossolana del sintema Bottiglieri-Palomonte BTL-PLM. Al di sopra di essi sono presenti depositi di coltre detritico-colluviale e di frana, e nel fondovalle di depositi alluvionali attuali e recenti. Caratterizzato da depositi conglomeratico-ghiaiosi, il sintema di Bottiglieri e Palomonte BTL-PLM, è stato già individuato nello studio del Lotto1A ed è stato classificato in parte a comportamento coesivo, in parte a comportamento granulare, in base alla facies di appartenenza.

In questa tratta è prevista la realizzazione di alcune opere all'aperto e di una galleria artificiale.

### **Pk 1+400 ÷ 1+700:**

Depositi ghiaioso-sabbiosi del Sintema di Bivio (RGC), che ricoprono i depositi della facies fine del sintema BTL-PLM. La Formazione delle Ghiaie del Cerreto è caratterizzata da ghiaie, conglomerati e brecce di conoide torrentizio; pertanto, è stato ipotizzato un comportamento granulare

In questa tratta è prevista la realizzazione dell'imbocco lato SA di una galleria.

### **Pk 1+700 ÷ 2+600**

In quest'area sono presenti i depositi ghiaioso-sabbiosi del sintema di Bivio RGC che ricoprono quelli del sintema BTL-PLM. Il substrato prequaternario è costituito dalle argille varicolori superiori ALV, con aspetto caotico.

Considerando gli strati più superficiali si considera valido quanto già specificato per la tratta precedente.

In questa tratta è prevista la realizzazione di una galleria naturale.

### **Pk 2+600 ÷ 3+000**

Il substrato prequaternario è costituito dalle argille varicolori ALV. Al di sopra di esso è presente uno spessore variabile di coltre detritico-colluviale, in parte coinvolta in movimenti franosi.

Le Argille Varicolori Superiori ALV sono caratterizzate da alternanze litologiche simili, costituite da livelli marnoso-argillosi e da bancate di calcari e calcari marnosi. In generale i litotipi del *Gruppo delle Argille Varicolori* si presentano spesso destrutturati, alterati o comunque poco compatti, tuttavia, vengono considerati a comportamento coesivo come già analizzato per il Lotto1A.

In questa tratta è prevista la realizzazione dell'imbocco lato RC della stessa galleria del tratto precedente e alcune opere all'aperto.

### **Pk 3+000 ÷ 3+200**

Il substrato prequaternario, costituito dai litotipi della formazione FMS, è coperto da coltre detritico-colluviale per uno spessore di circa 1-3 m. La Formazione del Selli (FMS) rientra tra il Gruppo delle Argille Varicolori, ma è rappresentata maggiormente da calcari marnosi, rispetto alle ALV. Avendo riscontrato anche questa formazione nei precedenti studi, si può conferire a questo litotipo un comportamento coesivo.

In questa tratta è prevista la realizzazione dell'imbocco lato SA di una galleria.

### **Pk 3+200 ÷ 4+950**

Area complessa dal punto di vista del substrato prequaternario, per la presenza di numerosi contatti anche di natura tettonica. La galleria sviluppata in direzione Reggio Calabria dovrebbe intercettare i litotipi appartenenti alle formazioni del Gruppo delle Argille Variegate, in particolare FMS e ALV. Non si esclude la presenza di limitata scaglie tettoniche di calcari CRQ, osservate in affioramento e nei sondaggi più a nord.

Il substrato è coperto da depositi fluivo-torrentizi RGC. Non si esclude la presenza di lenti di BTL-PLM tra il substrato e i depositi RGC.

Si fa presente che la Formazione dei i Calcari con Requinie e Gasteropodi (CRQ) è tra quelle di maggiore rilevanza; è costituita da calcari grigi generalmente ben stratificati, di conseguenza rappresenta un litotipo con caratteristiche geotecniche differenti rispetto alle formazioni finora descritte. Tuttavia, essendo specificata la loro presenza limitata nell'area, si può considerare questa tratta assimilabile a quella precedente, in quanto già riscontrata le formazioni di FMS e ALV, associate a comportamenti coesivi.

In questa tratta è prevista la realizzazione di una galleria naturale.

### **Pk 4+950 ÷ 5+400**

Area complessa dal punto di vista del substrato prequaternario, per la presenza di numerosi contatti anche di natura tettonica. La galleria sviluppata in direzione Reggio Calabria dovrebbe intercettare i litotipi appartenenti alle formazioni dell'Unità tettonica del Sele, in particolare TUT e ALV. Non si esclude la presenza limitata di scaglie tettoniche di calcari CRQ, osservate in affioramento e nei sondaggi più a nord.

Il substrato è coperto da depositi fluivo-torrentizi RGC o BTL-PLM.

Rispetto alle precedenti tratte qui si riscontrano anche le formazioni delle Tufiti di Tusa (TUT), litotipo arenaceo-marnoso appartenente all'Unità Tettonica Val di Sele, associabili per questo ad un comportamento coesivo.

Non essendo noto lo spessore dei depositi che ricoprono il substrato, gli affioramenti di RGC e BTL-PLM sono stati esclusi dalla caratterizzazione del comportamento geologico.

### **Pk 5+400 ÷ 6+200**

Area caratterizzata dalla presenza di litotipi del substrato prequaternario, appartenenti alle formazioni dell'Unità tettonica del Sele, in particolare AVF e ALV in contatto per faglia, sormontati dai depositi plio-quadernari (b e bn e AUL). Non si esclude la presenza di limitate scaglie tettoniche di calcari CRQ, osservate in affioramento e nei sondaggi più a est.

In quest'area si ritengono valide le stesse considerazioni illustrate per le chilometriche in cui è presente ALV, in quanto, le AVF (Argille Varicolori Inferiori), trattandosi di argilliti grigio-brune, argilliti siltoso-marnose, argilliti quarzolitiche e argilliti scagliose e già incontrate nell'ambito dello studio geologico del Lotto1A, sono state classificate a comportamento coesivo

### **Pk 6+200 ÷ 6+300**

Area caratterizzata dalla presenza di litotipi del substrato prequaternario, appartenenti alle formazioni dell'Unità tettonica del Sele, in particolare ALV, sormontati dai depositi plio-quadernari (AUL) per uno spessore > 40 m.

Come strato più superficiale, quindi si ha il Sintema di Auletta, caratterizzato da conglomerati più o meno cementati con ghiaie e ciottoli e livelli sabbiosi e limoso-sabbiosi: a tale Formazione può essere attribuito un comportamento granulare.

In questa tratta è prevista la realizzazione dell'imbocco di una galleria

### **Pk 6+300 ÷ 21+800**

Area complessa dal punto di vista del substrato prequaternario, per la presenza di numerosi contatti anche di natura tettonica, non facilmente tracciabili in profondità. La galleria è suddivisibile in 5 settori con caratteristiche geologiche similari:

- Nel tratto compreso tra le pk 6+300 ÷ 8+400 circa dovrebbe dapprima intercettare i depositi appartenenti al sintema di AUL e successivamente i litotipi appartenenti alle formazioni dell'Unità tettonica del Sele, in particolare ALV. Non si esclude la presenza di limitata scaglie tettoniche di calcari CRQ, osservate in affioramento e nei sondaggi più a nord.
- Nel tratto compreso tra le pk 8+400 ÷ 10+000 circa dovrebbe intercettare il substrato carbonatico rappresentato dal CRQ, dislocato da possibili contatti tettonici prevalentemente verticali e con carsismo potenziale.
- Nel tratto compreso tra le pk 10+000 ÷ 15+200 circa dovrebbe dapprima intercettare i depositi appartenenti al sintema di AUL e successivamente i litotipi appartenenti alle formazioni dell'Unità del SIE.
- Nel tratto compreso tra le pk 15+200 ÷ 20+800 dovrebbe intercettare il substrato carbonatico rappresentato dal CRQ e dal DBS, dislocato da possibili contatti tettonici sia verticali che orizzontali, con carsismo potenziale.

- Nel tratto compreso tra le pk 20+800 ÷ 21+800 dovrebbe intercettare i depositi di ambiente lacustre / fluviale / di conoide alluvionale appartenenti al BUO e al PAD.

In questa tratta è prevista la realizzazione di una galleria.

### **Pk 21+800 ÷ 21+900**

Area di conoide corrispondente al passaggio tra i depositi più antichi BUO e quelli più recenti PAD. Si tratta di depositi lacustri costituiti da argille grigie, a luoghi alternati a livelli sabbiosi e lenti di ghiaie fluviali, in eteropia a depositi di conoide alluvionale e in subordine fluviali, costituiti da conglomerati e ghiaie con matrice sabbiosa e intercalazioni di lenti di sabbie e limi.

Il Sintema di Buonabitacolo (BUO) e il Sintema della Certosa di Padula (PAD) possono definirsi a comportamento più granulare rispetto alle formazioni analizzate finora, in quanto presenti in zona di conoide.

In questa tratta è prevista la realizzazione dell'imbocco di una galleria.

### **Pk 21+900 ÷ 48+800**

Depositi fluvio-lacustri costituiti da alternanze di argille, limi-sabbiosi passanti a sabbie limose, con lenti ghiaiose e possibili livelli torbosi, in eteropia a depositi ghiaiosi e ghiaioso-sabbiosi fluviali e di conoide alluvionale costituiti da ghiaie, con matrice limoso-sabbioso-argillosa talora prevalente.

Anche questi, come i precedenti, possono essere classificati a comportamento "granulare".

Le Formazioni affioranti, delle quali è stata esposta una breve descrizione pocanzi, possono essere raggruppate in base al litotipo e al loro comportamento geotecnico, per una comprensione maggiore e per una valutazione ai fini dello studio vibrazionale, oggetto del presente studio. Pertanto, ai fini di tale studio, sono state considerate le tratte delle opere all'aperto e degli imbocchi delle gallerie, e sono stati esclusi le tratte che prevedono unicamente la realizzazione in galleria (sia naturale che antropica).

### **In sintesi per il Lotto 1B:**

- Nelle tratte della linea comprese tra le Pk 0+000 ÷ 1+400, Pk 2+600 ÷ 3+000, Pk 3+000 ÷ 3+200, Pk 4+950 ÷ 5+400, Pk 5+400 ÷ 6+200 sono stati osservati litotipi essenzialmente classificati come coesivi, alcuni dei quali già riscontrati nei precedenti studi effettuati sul Lotto 1A.

- Nelle tratte della linea comprese tra le Pk 1+400 ÷ 1+700, Pk 1+700 ÷ 2+600; Pk 6+200 ÷ 6+300, Pk 21+800 ÷ 21+900, Pk 21+900 ÷ 48+800 sono stati osservati litotipi essenzialmente classificati come granulari, soprattutto vista la modesta presenza di Formazioni di ambiente di conoide o depositi fluvio-lacustri.

Considerando tutte le chilometriche del Lotto1B e la classificazione dei litotipi presenti, alcuni come già specificato, riscontrati nella tratta del Lotto1A, è possibile considerare tale terreno paragonabile al terreno analizzato per le linee del Lotto1A e del Lotto1B: di conseguenza la risposta per lo studio vibrazionale si può considerare omogenea con i precedenti studi.

Si ricorda che le informazioni indicate per il presente paragrafo sono state recepite dalle Relazioni Geologiche di riferimento.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>LOTTO 1 BATTIPAGLIA - PRAIA</b> <b>LOTTO 1B ROMAGNANO - BUONABITACOLO</b> <b>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</b>					
	<b>Relazione Generale</b>	COMMESSA RC2A	LOTTO B1 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. C

### 3.2 Propagazione delle onde vibrazionali: Modello previsionale

Il quadro previsionale è stato sviluppato mediante l'adozione di un modello di propagazione teorico supportato da dati sperimentali. Nel caso specifico, a seguito di indagini del territorio in esame, sono stati utilizzati i dati desunti dai rilievi vibrazionali eseguite per valutare la catena di trasmissione delle vibrazioni.

Per valutare le potenziali situazioni di impatto vibrazionale è necessario conoscere i tre elementi di seguito elencati:

- emissione della sorgente;
- propagazione nei terreni;
- risposta dei fabbricati.

I tre elementi suddetti rappresentano pertanto la base indispensabile per lo sviluppo del modello sperimentale.

Il livello di vibrazione in corrispondenza di un ricevitore ad una distanza "x" dalla sede ferroviaria è pari al livello alla distanza di riferimento "x<sub>0</sub>", diminuito della somma delle attenuazioni che si verificano nel terreno tra x<sub>0</sub> e x:

$$L(x) = L(x_0) - \sum_i A_i$$

Il livello di base L(x<sub>0</sub>) è generalmente ricavato da misure sperimentali svolte in adiacenza alle linee ferroviarie a distanze comprese tra 3 m e 35 m.

In maggior dettaglio, il fenomeno con cui un prefissato livello di vibrazioni imposto sul terreno si propaga nelle aree circostanti è correlato alla natura del terreno, alla frequenza del segnale e alla distanza fra il punto di eccitazione e quello di valutazione dell'effetto. In generale, in caso di sorgenti superficiali, la funzione di propagazione delle vibrazioni è del tipo seguente e dipende dalla distanza, dalla tipologia di suolo e di sorgente di emissione:

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

Il metodo previsionale dei livelli di vibrazione ha impiegato simulazioni numeriche, basate su funzioni di propagazione di tipo logaritmico opportunamente ricavate tramite regressione logaritmica da misure sperimentali effettuate in campo. Tale metodologia permette di caratterizzare la propagazione della sorgente, in questo caso traffico ferroviario, in relazione alle caratteristiche intrinseche del terreno.

In dettaglio, si illustrano i passi seguiti nell'elaborazione. La valutazione dei livelli vibrazionali è stata condotta a fronte dell'acquisizione dell'emissione del fenomeno considerato (transito dei diversi tipi di convoglio ferroviario), utilizzando rilievi strumentali eseguiti in corrispondenza di opere civili specifiche (p.es. rilevati, viadotto e/o galleria). Le indagini sperimentali sono state eseguite impiegando tre terne accelerometriche posizionate a distanze note (p.es. 5m, 10m e 15m) dalla sorgente vibratoria (traffico ferroviario), le quali hanno acquisito i dati afferenti al vettore somma, come richiesto dalla UNI 9614:2017, contemporaneamente. In simultanea ai rilievi delle vibrazioni sono

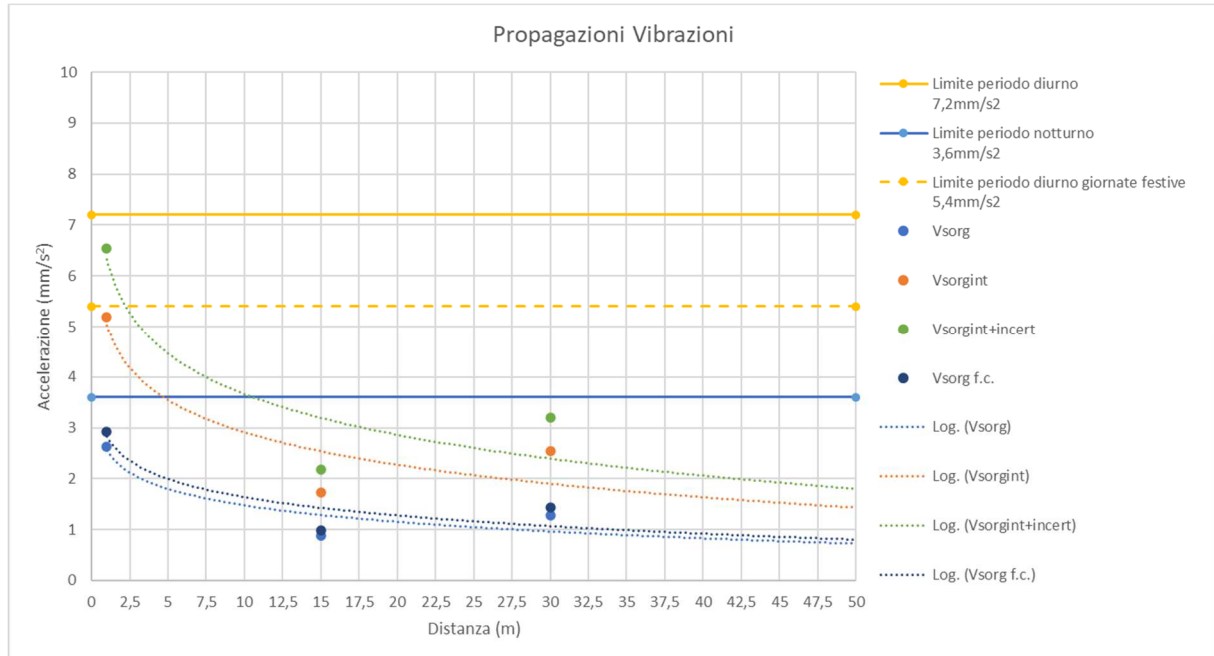
stati acquisiti i mezzi effettivamente transitati. Questa metodologia di condurre l'indagine ha permesso la successiva associazione fra tipologia di evento e tipologia di mezzo transitato (IC/ES; Merci, Regionale, ecc.).

La caratterizzazione di emissione dei veicoli (come vettore medio e deviazione standard della popolazione del campione in esame) ha permesso la successiva fase di taratura e verifica del modello di propagazione determinando il Vettore Immissione e il Vettore Residuo nelle postazioni di indagine, i quali hanno permesso conseguentemente la determinazione del Vettore vibrazione della sorgente, valutando la bontà della regressione ottenuta tramite il coefficiente di determinazione R quadro. Il coefficiente R quadro, o coefficiente di determinazione, è un indice statistico che permette di valutare se un modello di regressione può essere affidabile ossia misura il legame tra la variabilità dei dati e la correttezza del modello statistico utilizzato. R quadro prossimo a 0 indica un modello le cui variabili predittive non spiegano la variabilità della y intorno alla sua media, mentre un R quadro prossimo a 1 indica un modello le cui variabili indipendenti riescono a predire completamente la variabilità della y intorno alla sua media. Nella fase di predizione del modello di propagazione, variando i parametri di input della sorgente come il numero di veicoli e la velocità in relazione alla loro tipologia è possibile predire il relativo Vettore Sorgente in funzione dei diversi parametri. Tale Vettore, una volta tarato, è stato ulteriormente elaborato per tenere in considerazione dell'amplificazione delle vibrazioni interne agli edifici e dell'incertezza associata al modello previsionale.

Di seguito un grafico di esempio nel quale sono riportati i punti che individuano il Vettore Sorgente alle diverse distanze prese in esame, i punti con del Vettore Sorgente con la relativa amplificazione, necessaria per la valutazione interna agli edifici e, infine, le posizioni del Vettore Sorgente che oltre all'amplificazione considera l'incertezza associata al modello. Ad ogni popolazione di punti è associata la relativa funzione di regressione logaritmica che approssima la funzione di propagazione delle vibrazioni e che sarà usata per la predizione del livello di vibrazioni ai ricettori.

Nei paragrafi seguenti sono commentate e definite le funzioni di variazione della funzione di trasferimento in base alla variazione della velocità di transito, l'analisi dell'amplificazione delle vibrazioni interno agli edifici e all'incertezza associata al modello.





**Figura 3-4 - Funzioni di trasferimento delle vibrazioni in base ai dati sperimentali (Azzurro), a seguito della taratura applicando un fattore correttivo (blu), con l'incremento del f.c. e dell'amplificazione (giallo), con l'incremento del f.c., dell'amplificazione ed incertezza del modello (verde)**

### 3.2.1 Attenuazione geometrica

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

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

dove:

- d distanza dall'asse della linea ferroviaria;
- d<sub>0</sub> distanza di riferimento;
- n=0,5 per galleria;
- n=1 per tracciato di superficie.

### 3.2.2 Velocità di transito

La velocità di transito dei veicoli 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 mezzo, ossia:

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>LOTTO 1 BATTIPAGLIA - PRAIA</b> <b>LOTTO 1B ROMAGNANO - BUONABITACOLO</b> <b>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</b>					
	<b>Relazione Generale</b>	COMMESSA <b>RC2A</b>	LOTTO <b>B1 R 22</b>	CODIFICA <b>RG</b>	DOCUMENTO <b>IM0004 002</b>	REV. <b>C</b>

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

dove:

- L e L<sub>0</sub>: sono i livelli di vibrazioni in decibel;
- V e V<sub>0</sub>: sono le rispettive velocità di transito dei veicoli.

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.

### 3.2.3 *Caratterizzazione della sorgente*

Per quanto concerne la sorgente costituita dal complesso treno-armamento è fondamentale la conoscenza dei seguenti elementi base:

a) Materiale rotabile:

- tipologia dei veicoli;
- carico per ruota;
- lunghezza del veicolo;
- interperno;
- passo del carrello;
- caratteristiche di aggressività;
- condizioni di alterazione dell'interfaccia ruota-rotaia;
- rigidità e capacità dissipativa della sospensione primaria del carrello del veicolo;
- caratteristiche dei sistemi di attacco della rotaia.

b) Armamento

- massa della rotaia;
- rigidità;
- smorzamenti;
- masse;
- coefficienti di difettosità.

### 3.2.4 *Propagazione delle onde nei terreni*

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 ed i più determinanti sono costituiti dalla natura del mezzo, dal suo grado di costipazione, dall'attrito statico fra i granuli e quindi dalla granulometria, dalla fratturazione del mezzo, dalla presenza di acqua e da altri fattori la cui differente combinazione può determinare gradi di attenuazione differenti in mezzi litologicamente simili,

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

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

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	Velocità di Propagazione	Fattore di Perdita
	[t/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	$\eta$
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

**Tab. 3.1 - Valori tipici di densità, velocità di propagazione e fattore di perdita per tipologia di terreno**

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;  
 $\Omega$ : frequenza [rad\*s<sup>-1</sup>];  
 $\eta$ : coefficiente 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";  
 $c_c, c_a$  = velocità di propagazione nei suoli "c" e "a".

In considerazione della tipologia dei terreni interessati, per la costruzione del modello sperimentale sono stati utilizzati i dati rilevati dalla campagna di rilievi in campo, 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.

### 3.2.5 Propagazione delle onde nelle strutture edilizie

La propagazione delle vibrazioni negli edifici antistanti le linee ferroviarie e la risposta di pareti e solai dipende dalle caratteristiche costruttive dell'edificio, al fine delle valutazioni è importante separare due aspetti fondamentali del fenomeno:

- l'interazione suolo-fondazioni;
- la propagazione nel corpo dell'edificio.

Il primo aspetto è legato al fatto che la mancanza di solidarietà all'interfaccia terreno-struttura dà luogo a fenomeni dissipativi, configurandosi come un fenomeno favorevole. Detto fenomeno è perciò condizionato dalla tipologia delle fondazioni (fondazioni a platea, fondazioni su plinti isolati, pali di fondazioni, ecc.). Nel caso di fondazioni a platea la grande area di contatto con il terreno determina una perdita di accoppiamento praticamente nulla alle basse frequenze fino alla frequenza di risonanza della fondazione. Per le altre tipologie di fondazioni possono essere utilizzate curve empiriche che consentono la stima dei livelli di vibrazione della fondazione in funzione dei livelli di vibrazione del terreno.

La propagazione nel corpo dell'edificio è determinante sia per il disturbo agli abitanti sia per la resistenza delle strutture in quanto i pavimenti, pareti e soffitti degli edifici sono soggetti a significative amplificazioni delle vibrazioni rispetto a quelle trasmesse dalle fondazioni. In molti casi la risonanza delle strutture orizzontali può causare un'amplificazione delle vibrazioni nel campo di frequenze comprese tra 10 e 30 Hz. I problemi maggiori si verificano quando la frequenza di risonanza dei solai coincide con la frequenza di picco dello spettro di vibrazione del terreno. Negli edifici moltiplicano un valore di attenuazione delle vibrazioni da piano a piano è approssimativamente pari a 3 dB. I risultati di misure sperimentali (Ishii e Tachibana) in un edificio a 10 piani fuori terra con struttura in calcestruzzo armato e acciaio mostrano un'attenuazione di circa 1 dB alle basse frequenze in corrispondenza dei piani alti e maggiore di 3 dB ai primi piani.

La norma DIN 4150 riferisce che, nel caso di vibrazioni orizzontali le frequenze proprie dei piani di un edificio seguono all'incirca la legge  $f = 10/n$ , essendo  $n$  il numero del piano. Per la componente verticale si hanno circa  $f = 10$  Hz per pavimenti poco rigidi e  $f = 30$  Hz per pavimenti molto rigidi. Gli incrementi per risonanza possono essere dell'ordine di 3÷8 volte, con rari casi di incrementi fino a 15 volte. Risultati analoghi sono stati ottenuti nel corso di misure eseguite dalle Ferrovie Svizzere: generalmente si ha un'attenuazione nelle componenti orizzontali  $x$  e  $y$  ( $f = 0\div 80$  Hz) tra suolo e piano terra degli edifici, ma si verifica un'amplificazione della componente verticale  $z$  tra suolo e piano terra e suolo-primo piano. Mediamente l'amplificazione sul pavimento è di 5 dB per frequenze di risonanza di circa 20 Hz, ma può arrivare anche a 20 dB nel caso del pavimento del piano terra con frequenza di risonanza di circa 40 Hz.

La differenza tra il livello di vibrazione del terreno e quello delle strutture di fondazione è detta attenuazione per perdita di accoppiamento (coupling loss). Sono disponibili valori sperimentali medi della perdita di accoppiamento in funzione della frequenza per fondazioni su pali nel terreno o su plinti di edifici in muratura, con o senza intelaiatura. Per fondazioni a platea generale, dato che la vibrazione della stessa può essere considerata simile a quella che si verificherebbe nel terreno senza la presenza della platea, la perdita di accoppiamento è zero alle basse frequenze fino alla frequenza di risonanza della platea.

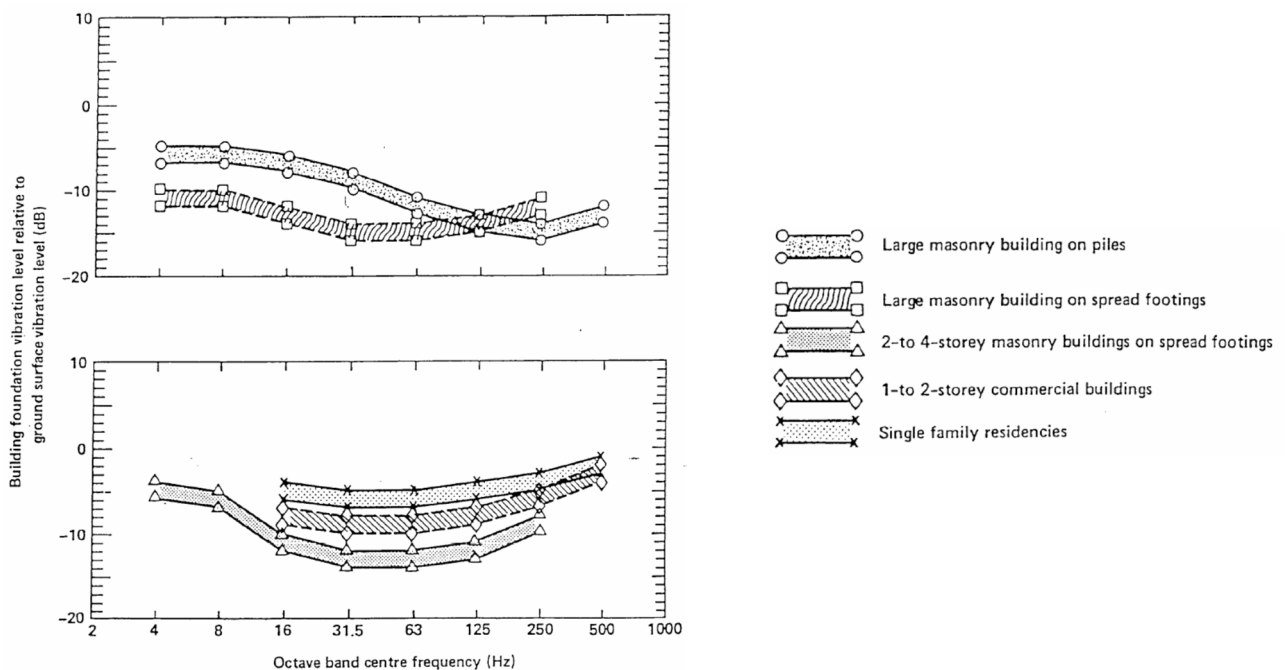
Eseguendo un'analisi più ampia del fenomeno della variazione delle vibrazioni a seguito della trasmissione dal terreno al corpo di fabbrica dell'edificio si andranno a considerare alcune strutture complesse e casi di effetti delle vibrazioni, per opere analoghe, all'interno degli edifici.

Considerando la struttura complessa degli edifici, collegata al terreno mediante sistemi di fondazione di vario genere, i livelli di accelerazione riscontrabili all'interno degli stessi possono presentare sia attenuazioni che amplificazioni rispetto ai livelli sul terreno.

In particolare, diversi sistemi di fondazione producono una attenuazione più o meno pronunciata dei livelli di accelerazione misurabili sulla fondazione stessa rispetto a quelli nel terreno circostante. Tale aspetto è legato al fatto

che l'interfaccia terreno-struttura non è perfettamente solidale e pertanto genera fenomeni dissipativi. Detto fenomeno è condizionato dalla tipologia delle fondazioni (a platea, su plinti isolati, su travi rovesce, su pali, etc.). Nel caso di fondazioni a platea la grande area di contatto con il terreno determina una perdita di accoppiamento praticamente di 0 dB alle basse frequenze sino alla frequenza di risonanza della fondazione. Per le altre tipologie di fondazioni possono essere utilizzate curve empiriche che consentono la stima dei livelli di vibrazione della fondazione in funzione dei livelli di vibrazione del terreno.

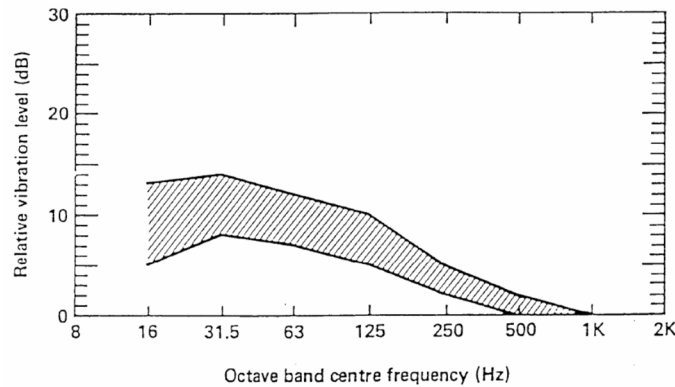
Di seguito si riportano le curve di attenuazione dovute a diversi tipi di fondazione.



**Figura 3-5 - curve di attenuazione dovute a diversi tipi di fondazione**

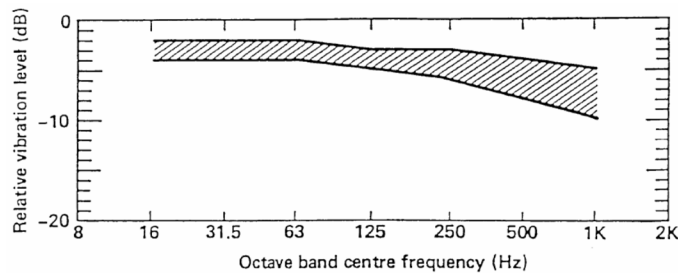
Oltre alla variazione delle vibrazioni per l'accoppiamento struttura/suolo è possibile l'instaurarsi del fenomeno della risonanza strutturale di elementi dei fabbricati, in particolare dei solai: allorché la frequenza di eccitazione coincide con la frequenza naturale di oscillazione libera della struttura, la stessa manifesta un rilevante aumento dei livelli di vibrazione rispetto a quelli presenti alla base della stessa.

Nella figura successiva è evidenziato il possibile campo di amplificazione delle vibrazioni dovuto alla risonanza dei solai, che oscilla fra 5 e 12 dB nel campo di frequenze rilevanti dal punto di vista dei transiti di mezzi.



**Figura 3-6 - curve di amplificazione prodotte dai solai**

Passando da ogni piano a quello sovrastante si verifica una progressiva riduzione dei livelli di vibrazione trasmessi. La curva seguente mostra il campo di variabilità tipico di tale attenuazione interpiano.



**Figura 3-7 - curve di attenuazione da un solaio al successivo**

In riferimento a dati disponibili in bibliografia si hanno i seguenti ulteriori risconti.

In base ai dati prodotti dalle Ferrovie Tedesche, desumibili dalla norma DIN 4150, gli incrementi per risonanza possono essere dell'ordine di 3 – 8 volte, con rari casi fino a 15 volte.

Le misure di Ishii e Tachibana mostrano una attenuazione interpiano che varia progressivamente da 3 dB ai piani bassi sino a 1 dB negli ultimi piani per un edificio a dieci piani con struttura in calcestruzzo armato e acciaio.

Le misure effettuate dalla Ferrovie Svizzere hanno mostrato che mediamente i livelli di accelerazione misurati sui pavimenti sono superiori di circa 5 dB rispetto a quelli misurati sul terreno, in alcuni casi si può arrivare ad un incremento anche di 20 dB nel caso del pavimento del piano terra con frequenza di risonanza di circa 40 Hz.

È ovvio, quindi, come l'effetto complessivo di questi fenomeni possa in genere portare ad una variazione dei livelli di vibrazione, misurati al centro dei solai, da 0 a 12 dB rispetto ai livelli sul terreno.

Una stima dell'effetto locale di riduzione/amplificazione di ciascun edificio è possibile parametrizzando gli effetti combinati secondo il seguente schema.

Si valuta l'attenuazione delle fondazioni. Essa viene assunta pari a 0 dB per le fondazioni a platea, a 3 dB per fondazioni su travi rovesce in CLS, ed a 5 dB nel caso di fondazioni in muratura o comunque nel caso di fondazioni che non abbiano capacità di immersione.

Si valuta l'amplificazione dovuta alla risonanza dei solai. Il valore di base assunto è una amplificazione di 5 dB per solai in laterocemento con frequenza propria di 20 Hz. A questo valore di base si può valutare di aggiungono i seguenti effetti:

- effetto della variazione della frequenza di risonanza: se la stessa è maggiore di 20 Hz e minore di 40 Hz, si incrementa linearmente il valore di base, che viene fatto variare da 5 dB a 20 Hz sino a 20 dB a 40 Hz;
- effetto dell'incastro del solaio: appoggio semplice -2.0 dB; incastro imperfetto 0.0 dB; incastro perfetto +5.0 dB;
- rapporto rigidezza/peso specifico del materiale: solaio in laterocemento 0.0 dB; volte o archi in muratura - 4.0 dB;
- spessore del solaio: h = 40 cm +8.0 dB, h = 30 cm +3.0 dB, h = 24 cm 0.0 dB, h = 12 cm -2.5 dB;
- luce del solaio: L = 10 m -4.0 dB, L = 7 m -3.0 dB, L = 5 m -2.0 dB, L = 4 m 0.0 dB, L = 3.5 m +3.0 dB, L = 3.0 m +8.0 dB;
- attenuazione interpiano: si assume prudenzialmente una riduzione di 1 dB per ogni piano al di sopra del piano terra.

Sulla base delle parametrizzazioni suddette, diviene possibile stimare in maniera approssimata per ogni edificio, note le sue caratteristiche costruttive, l'eventuale effetto di amplificazione massima sul solaio più sfavorito.

Le tipologie edilizie prevalenti in adiacenza al tracciato sono rappresentate da edifici sia in muratura, con fondazioni direttamente immerse nel terreno, che edifici di recente edificazione con ossatura in cemento armato e fondazioni continue. L'edificazione appare disomogenea e caratterizzata da abitazioni sparse e altezza media di uno/due piani.

In queste condizioni, sulla base di quanto sin ora detto, la differenza tra il livello di vibrazione del terreno e quello dell'edificio si stima cautelativamente pari a +5 dB per l'effetto combinato delle componenti positive, quali la perdita di accoppiamento suolo-fondazioni e l'attenuazione da piano a piano, e delle componenti negative di attenuazione, quali la risonanza alle frequenze proprie dei solai. L'approccio cautelativo con cui viene affrontato il tema è confermato anche da studi bibliografici di riferimento<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> VALUTAZIONE DEI LIVELLI DI VIBRAZIONI IN EDIFICI RESIDENZIALI. "Normativa, tecniche di misura e di calcolo di Angelo Farina, Università degli Studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria Industriale".



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>LOTTO 1 BATTIPAGLIA - PRAIA</b> <b>LOTTO 1B ROMAGNANO - BUONABITACOLO</b> <b>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</b>					
	<b>Relazione Generale</b>	COMMESSA RC2A	LOTTO B1 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. C

### 3.2.6 *Incertezza del modello*

È noto come la valutazione previsionale delle vibrazioni a cui è soggetto un edificio in prossimità di infrastrutture viarie sia estremamente difficoltosa a causa delle numerose variabili del calcolo. In letteratura si stima che la previsione di un modello di simulazione, pur conoscendo molti parametri, può avvenire con un livello di incertezza che può variare da 2 dB a 10 dB in funzione dell'accuratezza dell'informazione dei parametri disponibili e presi a riferimento.

Allo scopo di contenere l'incertezza sulla stima sono state fatte le seguenti considerazioni, che conducono ad una stima cautelativa dei livelli di vibrazione:

- a) i livelli di vibrazione sono stati tarati su base sperimentale con una incertezza inferiore a 5 dB,
- b) i dati di input delle sorgenti vibratorie sono stati considerati con riferimento alla massima emissione vibratoria, ottenendo così il valore massimo anche presso i ricettori,
- c) per valutare in modo cautelativo le vibrazioni immesse nell'edificio si è trascurata la perdita per trasmissione all'interno dell'edificio, utilizzando dunque il valore di vibrazione senza perdite,
- d) la valutazione dei livelli di vibrazione viene fornita in termini di distanza dall'asse ferroviario con approssimazione al metro superiore.

Ne consegue che la valutazione del superamento, pur avendo una incertezza intrinseca che può variare da 2 dB a 10 dB, dovuta alla difficoltà di modellizzazione del complesso fenomeno fisico che si vuole rappresentare, risulta sicuramente cautelativa.

In relazione all'analisi dei dati di indagine disponibili, alla valutazione della struttura del terreno derivante dall'esame del contesto geologico eseguito per questo modello sarà considerata una incertezza pari a +2 dB.

Per la valutazione della conformità sarà adottato il sistema, secondo la UNI TS/11326-2:2015, di valutazione A) ossia, accettazione ristretta + rifiuto allargato. Si considerano pertanto "entro il limite" solo i livelli che risultano certamente conformi, ovvero quei valori a cui è sommata l'incertezza risulta dal confronto con il limite, risultano entro i valori limite ossia sarà determinata la distanza entro la quale si individuano possibili fasce di superamento del limite.

### 3.2.7 *Rumore trasmesso per via solida dalle strutture*

Il rumore solido all'interno degli edifici è il risultato delle onde acustiche irradiate dalle superfici della stanza, includendo le pareti, i pavimenti, i soffitti e tutti gli altri elementi normalmente presenti quali finestre, porte, ecc. La relazione tra le ampiezze di vibrazione delle superfici della stanza ed i livelli di pressione sonora all'interno della stanza stessa è funzione del valore medio del coefficiente di assorbimento acustico che caratterizza le superfici, dalla dimensione e forma della stanza e della distribuzione del campo di vibrazione sulle superfici vibranti.

	<b>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>LOTTO 1 BATTIPAGLIA - PRAIA</b> <b>LOTTO 1B ROMAGNANO - BUONABITACOLO</b> <b>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</b>					
	<b>Relazione Generale</b>	COMMESSA RC2A	LOTTO B1 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. C

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

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

dove:

L<sub>p</sub>: livello di pressione sonora in dB (0 dB = 20 µPa)

L<sub>a</sub>: livello di vibrazione di accelerazione all'orizzontamento in dB (0 dB = 1 µg)

f: frequenza per bande a terzi di ottava in Hz

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

### 3.3 Indagini vibrometriche, taratura e validazione del modello

Per la caratterizzazione dell'emissione dell'infrastruttura ferroviaria in esercizio allo stato di progetto è stata effettuata una campagna di misure di vibrazioni mediante indagini su sezioni di misura, in ognuna delle quali è stata prevista l'installazione di tre terne accelerometriche.

In questa revisione si è proceduto ad integrare le misure condotte nella fase precedente, del settembre 2021, sostituendo la caratterizzazione della sezione di indagine sul tratto in rilevato con una più recente, dell'ottobre 2023. L'attuale indagine ha permesso quindi l'integrazione dei dati sperimentali in modo da avere a disposizione una valutazione aggiornata in riferimento anche alla caratterizzazione delle emissioni ferroviarie, oltre che ad una valutazione in riferimento alla UNI 9614:2017. Si evidenzia che l'indagine su rilevato si considera pertinente anche per la caratterizzazione della sezione in trincea. Altresì procedendo in questo modo si determina una valutazione cautelativa in quanto le sezioni in trincea potrebbero prevedere la presenza di muri di contenimento, fondati su pali, i quali potrebbero ridurre la propagazione delle vibrazioni. Le sezioni sono stata individuate in un tratto in rilevato, in galleria e su viadotto l'attuale linea in esercizio località Agropoli, provincia di Salerno. Le sezioni di indagine sono state scelte per analogia alle sezioni ferroviarie previste nell'intervento in progetto. Dall'analisi in post elaborazione dei dati sperimentali, rilevati dalla sezione di misura, sono stati individuati gli eventi ed a essi associata la tipologia di convoglio che ha compiuto il transito. Tale valutazione ha permesso quindi la caratterizzazione dell'emissione delle vibrazioni per ogni tipologia di convoglio in funzione della tipologia di opera civile e velocità di transito. Per i dettagli si rimanda all'apposito "Report dei rilievi vibrazionali".

	<b>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>LOTTO 1 BATTIPAGLIA - PRAIA</b> <b>LOTTO 1B ROMAGNANO - BUONABITACOLO</b> <b>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</b>					
	<b>Relazione Generale</b>	COMMESSA RC2A	LOTTO B1 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. C

### 3.3.1 Caratterizzazione emissione sorgente ferroviaria

I dati utilizzati per la caratterizzazione della sorgente si riferiscono a due campagne di rilevamenti eseguita lungo l'attuale linea in esercizio in tre sezioni di misura in località Agropoli, provincia di Salerno. Le sezioni indagate sono per le seguenti opere civili: galleria (Sez.1), viadotto (Sez.2) e rilevato (Sez.3).

#### 3.3.1.1 Sezione 1 - Galleria

Nella Sezione 1 la strumentazione è stata posizionata in corrispondenza di una sezione del corpo ferroviario in galleria (tratto al coperto), lungo la via di propagazione, per complessivi tre punti di misura. I rilievi hanno interessato tutte le tipologie di treni in transito, secondo il quadro sinottico sotto riportato.

Numero di treni rilevato durante le misure nella Sezione 1	
Tipologia treni	Periodo Diurno (osservazione dalle 8:00 alle 18:30 del 30/09/2021)
Regionali	16
EC/IC	9
ES	15
Merci	4
Totale transiti	44

Tab. 3.2 -- Treni transitanti sulla linea – SEZ.1 – caratterizzazione corpo ferroviario in galleria

Le tre terne accelerometriche sono state così posizionate:

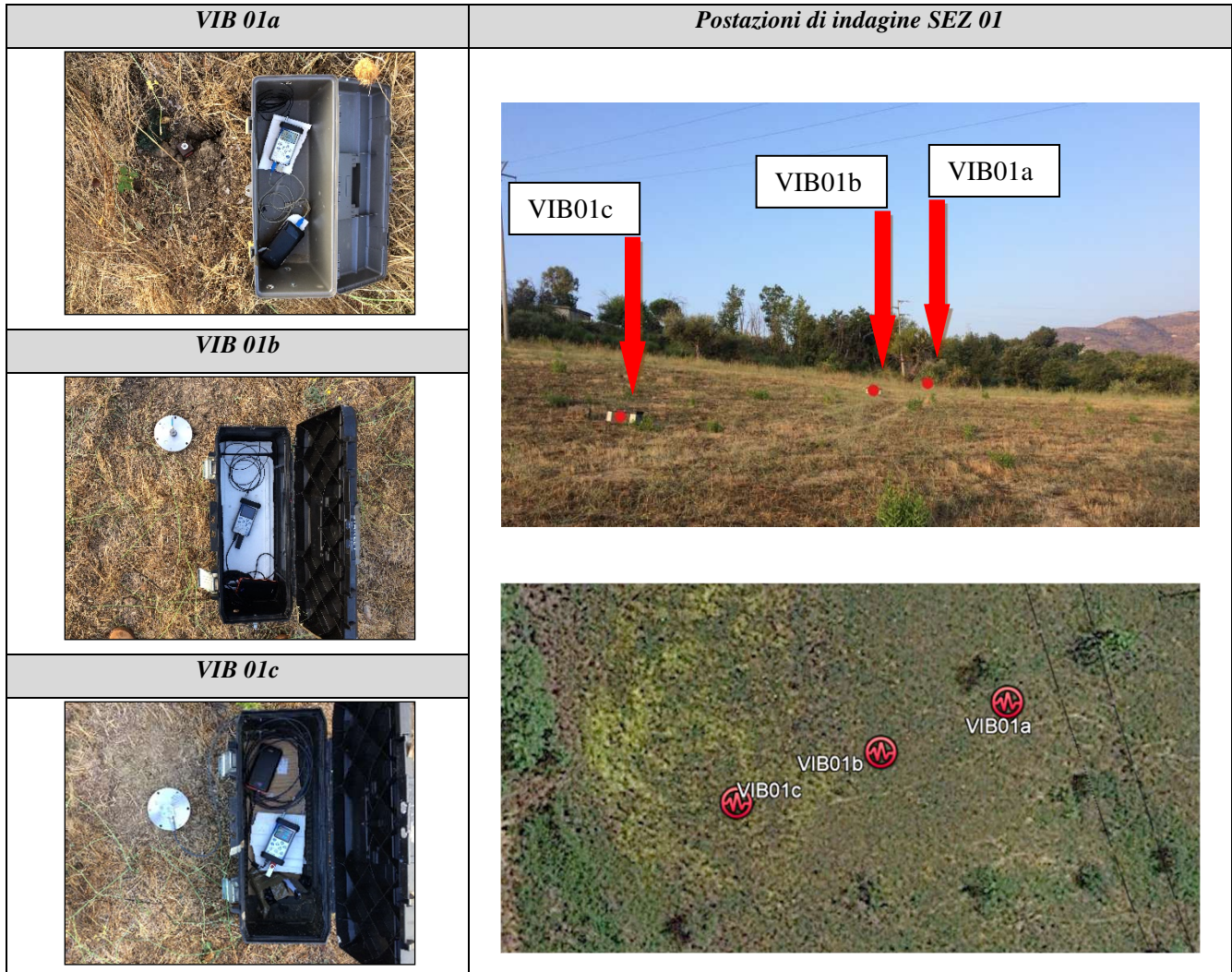
Identificazione Terna	Posizionamento
VIB 01a	In corrispondenza della galleria ferroviaria, a circa 3 metri dal binario più esterno
VIB 01b	Area verde a margine della linea ferroviaria, a circa 15 metri dal binario più esterno
VIB 01c	Area verde a margine della linea ferroviaria, a circa 30 metri dal binario più esterno

Tab. 3.3 - Identificazione delle terne accelerometriche e posizionamento SEZ.1

Di seguito la planimetria con l'indicazione delle postazioni di misura presso la linea ferroviaria.



Figura 3-8 - Ortofoto area di indagine e postazioni di misura SEZ.1



**Figura 3-9 - Report fotografico postazioni di misura SEZ.1**

Facendo riferimento al dettaglio dei rilievi sperimentali dei transiti, riportato nell'elaborato Studio Vibrazionale – Report misure vibrazioni, si caratterizzano i valori di accelerazione emessi dalla tipologia di convoglio relativa ai treni transitati.

Di seguito il vettore complessivo medio dell'accelerazione e la deviazione standard che caratterizza le sorgenti in base ai convogli rilevati nel periodo di osservazione dell'indagine sperimentale.

**Vettore complessivo medio dell'accelerazione e la deviazione standard che caratterizza le sorgenti**

Postazione	Tipologia veicolo	numero transiti valutati <sup>2</sup>	velocità media km/h	Media a <sub>w</sub> max m/s <sup>2</sup>	Sigma scarto a <sub>w</sub> m/s <sup>2</sup>	Vimm a <sub>w,95</sub> per Sorgente m/s <sup>2</sup>
VIB 1 (3m)	IC	15	65	0,0057	0,0023	0,0099
	MRC	15	108	0,0071	0,0039	0,0141
	REG	16	63	0,0048	0,0016	0,0077
	ES	15	74	0,0044	0,0013	0,0067
VIB 2 (15m)	IC	15	65	0,0090	0,0028	0,0140
	MRC	15	108	0,0082	0,0036	0,0148
	REG	16	63	0,0063	0,0019	0,0097
	ES	15	74	0,0069	0,0021	0,0107
VIB 3 (30m)	IC	15	65	0,0025	0,0008	0,0039
	MRC	15	108	0,0036	0,0015	0,0063
	REG	16	63	0,0021	0,0006	0,0032
	ES	15	74	0,0019	0,0002	0,0022

Il vettore residuo è stato ottenuto dall'indagine sperimentale e pari ai seguenti valori:

<b>Vettore residuo misurato</b>			
Postazione	Media a <sub>w</sub> max m/s <sup>2</sup>	Sigma scarto a <sub>w</sub> m/s <sup>2</sup>	Vres a <sub>w,95</sub> m/s <sup>2</sup>
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	0,0008	0,0001	0,0009
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	0,0009	0,0003	0,0015
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	0,0006	0,0001	0,0008

Per effettuare la verifica del modello della sorgente ferroviaria si è proceduto, a partire dalla caratterizzazione della sorgente ferroviaria per tipologia di convoglio, al calcolo del vettore sorgente del periodo di indagine (che non coincide necessariamente con il periodo diurno e/o notturno essendo la sorgente sempre la stessa indipendentemente dal periodo che si considera) ed a confrontarlo con il vettore sorgente ottenuto dalla misura.

Il vettore immissione (complessivo di tutti i transiti) misurato dall'indagine sperimentale è pari ai seguenti valori:

<b>Vettore immissione misurato</b>			
Postazione	Media a <sub>w</sub> max m/s <sup>2</sup>	Sigma scarto a <sub>w</sub> m/s <sup>2</sup>	Vimm a <sub>w,95</sub> m/s <sup>2</sup>
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	0,0055	0,0027	0,0103
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	0,0076	0,0029	0,0128
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	0,0025	0,0011	0,0045

<sup>2</sup> Il numero dei transiti valutati corrisponde a quelli rilevati e/o quelli minimi previsti dalla UNI 9614:2017 adottando le indicazioni della norma per l'identificazione degli eventi al fine del raggiungimento del numero minimo richiesto per la valutazione.

Il vettore immissione calcolato partendo dalla caratterizzazione della sorgente (considerando la stessa velocità e numero di transiti) si determina pari a:

Vettore immissione calcolato			
Postazione	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vimm $a_w,95$ $m/s^2$
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	0,0055	0,0010	0,0074
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	0,0076	0,0011	0,0095
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	0,0025	0,0007	0,0037

Ne consegue la determinazione del Vettore Sorgente nel caso di Vettore Immissione misurato e Vettore Immissione calcolato.

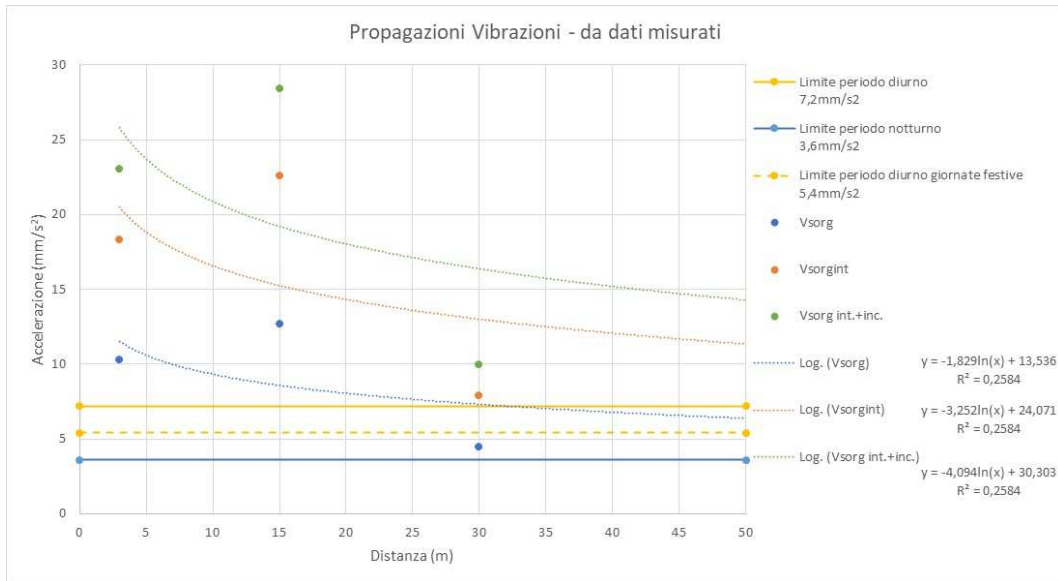
Vettore sorgente			
Postazione	Vettore sorgente calcolato $mm/s^2$	Vettore sorgente misurato $mm/s^2$	Differenza tra calcolato e misurato $mm/s^2$
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	7,3	10,3	-3,0
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	9,4	12,7	-3,3
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	3,6	4,4	-0,8

Dall'analisi dei valori si riscontra una sottostima del vettore sorgente calcolato rispetto a quello misurato. Per questo si procederà ad inserire un fattore correttivo che permetterà di tarare il modello e conseguentemente la funzione di trasferimento.

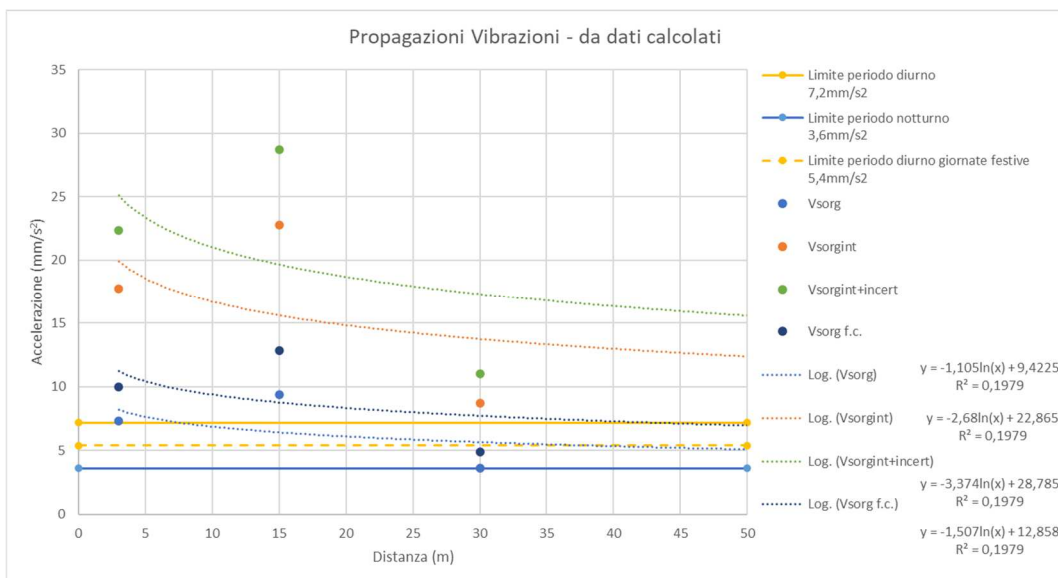
Vettore sorgente – individuazione fattore correttivo					
Postazione	Vettore sorgente calcolato $mm/s^2$	Fattore correttivo dB	Vettore sorgente calcolato corretto $mm/s^2$	Vettore sorgente misurato $mm/s^2$	Differenza tra calcolato e misurato $mm/s^2$
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	7,3	2,7	10,0	10,3	-0,30
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	9,4		12,8	12,7	0,11
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	3,6		4,9	4,4	0,47

In base all'applicazione del fattore correttivo si riscontrano uno scostamento tra valori calcolati e valori misurati da -0,30  $mm/s^2$  a +0,47  $mm/s^2$ .

Al fine della determinazione della propagazione delle vibrazioni nel terreno e all'interno degli edifici compresa l'incertezza del modello si provvedere a determinare la funzione di trasferimento a mezzo di regressione logaritmica determinata sia dai dati misurati che dai dati calcolati ai quali è stato applicato il fattore correttivo.



**Figura 3-10 – Funzione di trasferimento ottenuta da dati misurati per la SEZ.1**



**Figura 3-11 – Funzione di trasferimento ottenuta da dati predetti per la SEZ.1**

In base alle funzioni di regressione determinate dai set di dati di input considerati, al fine di valutarne l'eventuale scostamento, si riporta di seguito la tabella di confronto. I dati riportati di seguito fanno riferimento al periodo di

acquisizione dei dati sperimentali e non al periodo diurno o notturno; essi hanno lo scopo di verificare lo scostamento delle predizioni usando le regressioni derivanti o da dati misurati o da dati predetti al fine di validare quest'ultimi.

**Valutazione della funzione di trasferimento di propagazione delle vibrazioni nel terreno**

Distanza (x) m	funzione di propagazione basata su dati calcolati (+f.c.) $y = -1,507 \ln(x) + 12,858$	funzione di propagazione basata su dati misurati $y = -1,829 \ln(x) + 13,536$	Differenza tra calcolato e misurato mm/s <sup>2</sup>
	Vsorg f.c. - mm/s <sup>2</sup>	Vsorg - mm/s <sup>2</sup>	
3	11,2	11,5	-0,3
15	8,8	8,6	+0,2
30	7,7	7,3	+0,4

**Valutazione della funzione di trasferimento di propagazione delle vibrazioni considerando l'amplificazione degli edifici (+5dB) e l'incertezza del modello (+2dB)**

Distanza (x) m	funzione di propagazione basata su dati calcolati $y = -3,374 \ln(x) + 28,785$	funzione di propagazione basata su dati misurati $y = -4,094 \ln(x) + 30,303$	Differenza tra calcolato e misurato mm/s <sup>2</sup>
	Vsorg f.c. - mm/s <sup>2</sup>	Vsorg - mm/s <sup>2</sup>	
3	25,1	25,8	-0,7
15	19,6	19,2	+0,4
30	17,3	16,4	+0,9

Come si riscontra dal confronto fra la predizione ottenuta da dati calcolati a cui è applicato il fattore correttivo e la predizione della funzione di trasferimento ottenuta dai dati misurati si valuta uno scostamento tra valori calcolati e valori misurati tra -0,3 mm/s<sup>2</sup> e +0,4 mm/s<sup>2</sup> nel caso della funzione di trasferimento nel terreno; valori tra -0,7 mm/s<sup>2</sup> e +0,9 mm/s<sup>2</sup> nel caso della funzione di trasferimento che considera l'amplificazione negli edifici e l'incertezza modellistica. Il modello quindi, in generale, sovrastima l'emissione delle vibrazioni dalla distanza di circa 8 m dal binario.

Al fine dell'applicazione del modello definito in precedenza si deve valutare l'eventuale differenza tra il sito di indagine sperimentale, il quale ha permesso la definizione del modello e l'inserimento del tracciato nel reale contesto geologico. In questo caso dalla valutazione geologica effettuata e considerando che l'indagine sperimentale è stata eseguita in prossimità di opere civili rilevanti non si riscontrano tali singolarità e/o condizioni da far inserire fattori di variazioni del modello per differenze del territorio.



Per determinare la bontà del modello si procede ad eseguire la valutazione del parametro statistico R quadro. La valutazione dei dati sperimentali e quelli definiti dalle regressioni hanno definito delle funzioni di trasferimento con valore di R quadro di tra 0,20 e 0,26.

Si ricorda che R quadro prossimo a 0 indica un modello le cui variabili predittive non spiegano la variabilità della y intorno alla sua media, mentre un R quadro prossimo a 1 indica un modello le cui variabili indipendenti riescono a predire completamente la variabilità della y intorno alla sua media.

Pertanto, il valore ottenuto di R quadro non si ritiene accettabile considerando le multi-variabili che sono presenti nella propagazione delle vibrazioni in un terreno individuato come omogeneo, il quale dovrebbero indurre variazioni della propagazione delle vibrazioni nel suo percorso di allontanamento dalla sorgente facendole progressivamente diminuire.

Come si può dedurre dai risultati complessivi relativi alle indagini condotte sono stati registrati dei livelli di accelerazione, che non procedono in modo decrescente rispetto alla distanza dal binario tra la terna di misura vicino alla linea ferroviaria (a 3 m) e quella nella postazione intermedia (a 15 m). Questo risultato può essere stato determinato da caratteristiche impronosticabili e non prevedibili del terreno sottostante nonché dalle caratteristiche e/o singolarità presenti. Allontanandosi dalla linea ferroviaria, si riscontra tra la posizione intermedia (a 15 m) e la postazione di indagine più lontana (a 30m), valori che hanno un andamento decrescente con una tendenza a ridursi notevolmente.

In considerazione di quanto emerso dalla valutazione del parametro R quadro si ritiene il modello tarato, ma non idoneo per la valutazione per la valutazione della propagazione delle vibrazioni in corrispondenza dell'opera in progetto. Si procederà pertanto alla determinazione dei valori di propagazione e conseguentemente della funzione di trasferimento delle vibrazioni tra i dati ritenuti validi della sezione in galleria e quelli ottenuti per via proporzionale con i dati sperimentali definiti per la sezione in rilevato, la quale è ritenuta rappresentativa di un modello tarato e idoneo alla rappresentazione del fenomeno fisico in studio (§. 3.3.1.3).

Di seguito si riporta la caratterizzazione dei convogli ferroviari nella sezione in rilevato.

<b>Caratterizzazione dei convogli del rilevato</b>				
Distanza (m)	Vimm (mm/s <sup>2</sup> )			
	IC Vimm	ES Vimm	MRC Vimm	REG Vimm
6	51,4	26,3	34,0	33,4
11	16,9	9,1	11,8	10,6
16	13,1	7,0	7,4	8,3
Velocità media (km/h)	107	102	95	83

Definendo la funzione di trasferimento del  $V_{imm}$  della caratterizzazione dei convogli nella sezione in rilevato si determinano le emissioni per la sezione in galleria alle distanze considerate. Inoltre, tale caratterizzazione si definisce considerando la variazione delle velocità rilevate in rilevato a quelle della galleria ottenendo la tabella seguente.

<b>Caratterizzazione dei convogli del rilevato portato alle postazioni e alle velocità dell'indagine in galleria</b>				
Distanza (m)	$V_{imm}$ (mm/s <sup>2</sup> )			
	IC $V_{imm}$	ES $V_{imm}$	MRC $V_{imm}$	REG $V_{imm}$
3	59,9	33,5	55,4	43,7
11	18,7	10,7	16,6	13,4
16	6,8	4,1	5,4	4,7
Velocità media (km/h)	65	74	108	63

In riferimento alle indagini in galleria si considera l'indagine nelle postazioni prossima al tracciato in galleria (postazione a 3m) per definire la proporzionalità alle altre distanze (11m e 16m). In base a quanto elaborato dalla propagazione del rilevato riportato si ottiene quanto segue:

<b>Caratterizzazione dei convogli in galleria proporzionalmente alla propagazione in rilevato</b>				
Distanza (m)	$V_{imm}$ (mm/s <sup>2</sup> )			
	IC $V_{imm}$	ES $V_{imm}$	MRC $V_{imm}$	REG $V_{imm}$
3	9,9	6,7	14,1	7,7
11	3,1	2,1	4,2	2,4
16	1,1	0,8	1,4	0,8
Velocità media (km/h)	65	74	108	63

La precedente caratterizzazione sarà impiegata per definire la funzione di trasferimento delle vibrazioni. La taratura della funzione sarà eseguita sulla postazione di misura della sezione in galleria prossima ai binari, in quanto ritenuta valida e quindi possibile il confronto tra dato misurato e dato stimato.

Il vettore immissione (complessivo di tutti i transiti) misurato dall'indagine sperimentale in galleria è pari ai seguenti valori. L'indagine nella seconda e terza postazione non saranno considerate per quanto già esposto.

<b>Vettore immissione misurato</b>			
Postazione	Media $a_w$ max m/s <sup>2</sup>	Sigma scarto $a_w$ m/s <sup>2</sup>	$V_{imm}$ $a_w,95$ m/s <sup>2</sup>
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	0,0055	0,0027	0,0103
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	0,0076	0,0029	0,0128
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	0,0025	0,0011	0,0045

Il vettore immissione calcolato partendo dalla caratterizzazione della sorgente (considerando la stessa velocità e numero di transiti) dalla valutazione proporzionale con il rilevato si determina pari a:

<b>Vettore immissione calcolato</b>			
<b>Postazione</b>	<b>Media <math>a_w</math> max m/s<sup>2</sup></b>	<b>Sigma scarto <math>a_w</math> m/s<sup>2</sup></b>	<b>Vimm <math>a_w,95</math> m/s<sup>2</sup></b>
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	0,0055	0,0010	0,0074
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	0,0029	0,0008	0,0044
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	0,0010	0,0002	0,0014

Ne consegue la determinazione del Vettore Sorgente nel caso di Vettore Immissione misurato e Vettore Immissione calcolato.

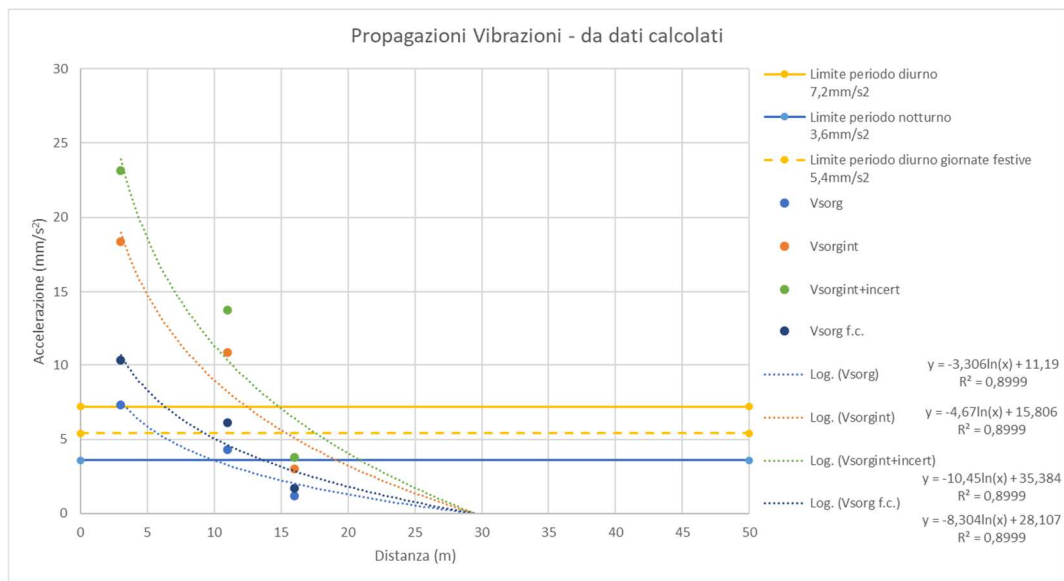
<b>Vettore sorgente</b>			
<b>Postazione</b>	<b>Vettore sorgente calcolato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Vettore sorgente misurato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Differenza tra calcolato e misurato mm/s<sup>2</sup></b>
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	7,3	10,3	-3,0
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	4,3	<i>misura scartata</i>	<i>non determinabile</i>
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	1,2	<i>misura scartata</i>	<i>non determinabile</i>

Dall'analisi dei valori si riscontra una sottostima del vettore sorgente calcolato rispetto a quello misurato. Per questo si procederà ad inserire un fattore correttivo che permetterà di tarare il modello e conseguentemente la funzione di trasferimento.

<b>Vettore sorgente – individuazione fattore correttivo</b>					
<b>Postazione</b>	<b>Vettore sorgente calcolato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Fattore correttivo dB</b>	<b>Vettore sorgente calcolato corretto mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Vettore sorgente misurato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Differenza tra calcolato e misurato mm/s<sup>2</sup></b>
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	7,3	3	10,3	10,3	+0,05
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	4,3		6,1	m.s.	n. d.
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	1,2		1,7	m.s.	n. d.

In base all'applicazione del fattore correttivo si riscontano uno scostamento tra valore calcolato e valore misurati nella misura di riferimento di +0,05 mm/s<sup>2</sup>.

Al fine della determinazione della propagazione delle vibrazioni nel terreno e all'interno degli edifici compresa l'incertezza del modello si provvedere a determinare la funzione di trasferimento a mezzo di regressione logaritmica determinata dai dati calcolati ai quali è stato applicato il fattore correttivo.



**Figura 3-12 – Funzione di trasferimento ottenuta da dati predetti per la SEZ.1 (galleria) a seguito della determinazione proporzionale con l'indagine nella SEZ.3 (rilevato)**

La funzione di propagazione basata su dati calcolati (+f.c.) relativa alla valutazione della funzione di trasferimento di propagazione delle vibrazioni nel terreno è pari a  $y = -8,304 \ln(x) + 28,107$  con R quadro pari a 0,90. La funzione di propagazione basata su dati calcolati relativa alla valutazione della funzione di trasferimento di propagazione delle vibrazioni considerando l'amplificazione degli edifici (+5dB) e l'incertezza del modello (+2dB) è pari a  $y = -10,45 \ln(x) + 35,384$  con R quadro pari a 0,90.

Per determinare la bontà del modello si procede ad eseguire la valutazione del parametro statistico R quadro. La valutazione dei dati sperimentali e quelli definiti dalle regressioni hanno definito delle funzioni di trasferimento con valore di R quadro di 0,90.

Si ricorda che R quadro prossimo a 0 indica un modello le cui variabili predittive non spiegano la variabilità della y intorno alla sua media, mentre un R quadro prossimo a 1 indica un modello le cui variabili indipendenti riescono a predire completamente la variabilità della y intorno alla sua media.

Pertanto, il valore ottenuto di R quadro si ritiene accettabile considerando le multi-variabili che sono presenti nella propagazione delle vibrazioni in un terreno individuato come omogeneo, il quale dovrebbero indurre variazioni della propagazione delle vibrazioni nel suo percorso di allontanamento dalla sorgente facendole progressivamente diminuire.

In considerazione di quanto ottenuto si ritiene il modello tarato e cautelativo per la valutazione della propagazione delle vibrazioni in corrispondenza dell'opera in progetto.

### 3.3.1.2 Sezione 2 - Viadotto

Nella Sezione 2 la strumentazione è stata posizionata in corrispondenza di una sezione del corpo ferroviario in viadotto, lungo la via di propagazione, per complessivi tre punti di misura. I rilievi hanno interessato tutte le tipologie di treni in transito, secondo il quadro sinottico sotto riportato.

Numero di treni rilevato durante le misure nella Sezione 2	
Tipologia treni	Periodo Diurno (osservazione dalle 9:00 alle 18:30 del 30/09/2021)
Regionali	14 per VIB 02a e VIB 02c / 7 per VIB 02b
EC/IC	9 per VIB 02a e VIB 02c / 5 per VIB 02b
ES	14 per VIB 02a e VIB 02c / 6 per VIB 02b
Merci	4 per VIB 02a e VIB 02C / 2 per VIB 02b
Totale transiti	41 per VIB 02a e VIB 02c / 20 per VIB 02b

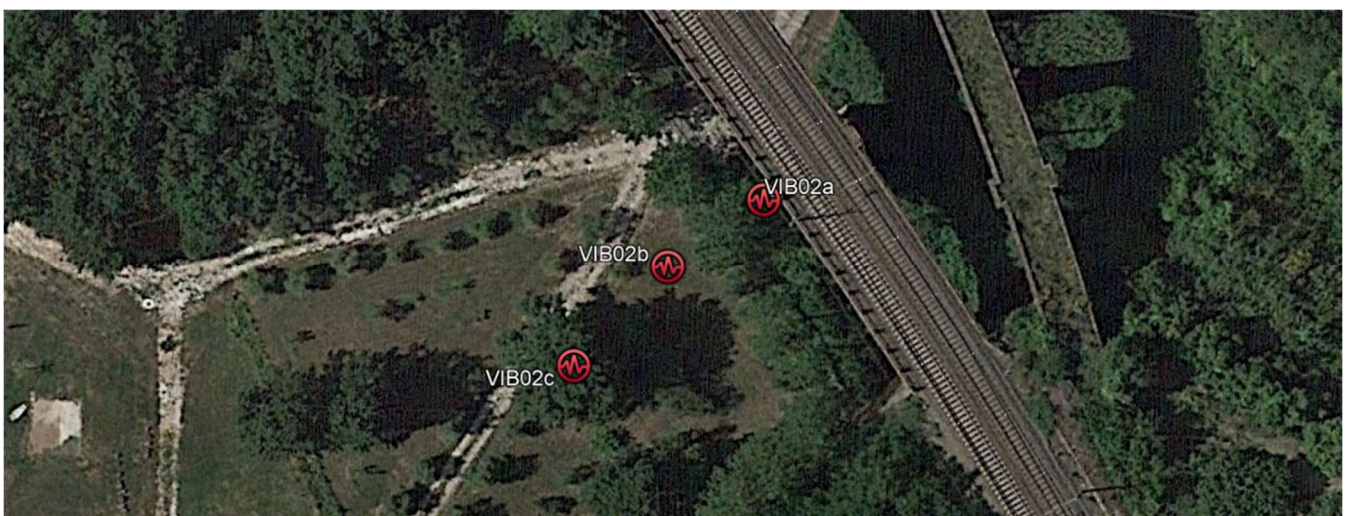
**Tab. 3.4 - Treni transitanti sulla linea – SEZ.2 – caratterizzazione corpo ferroviario in viadotto**

Le tre terne accelerometriche sono state così posizionate:

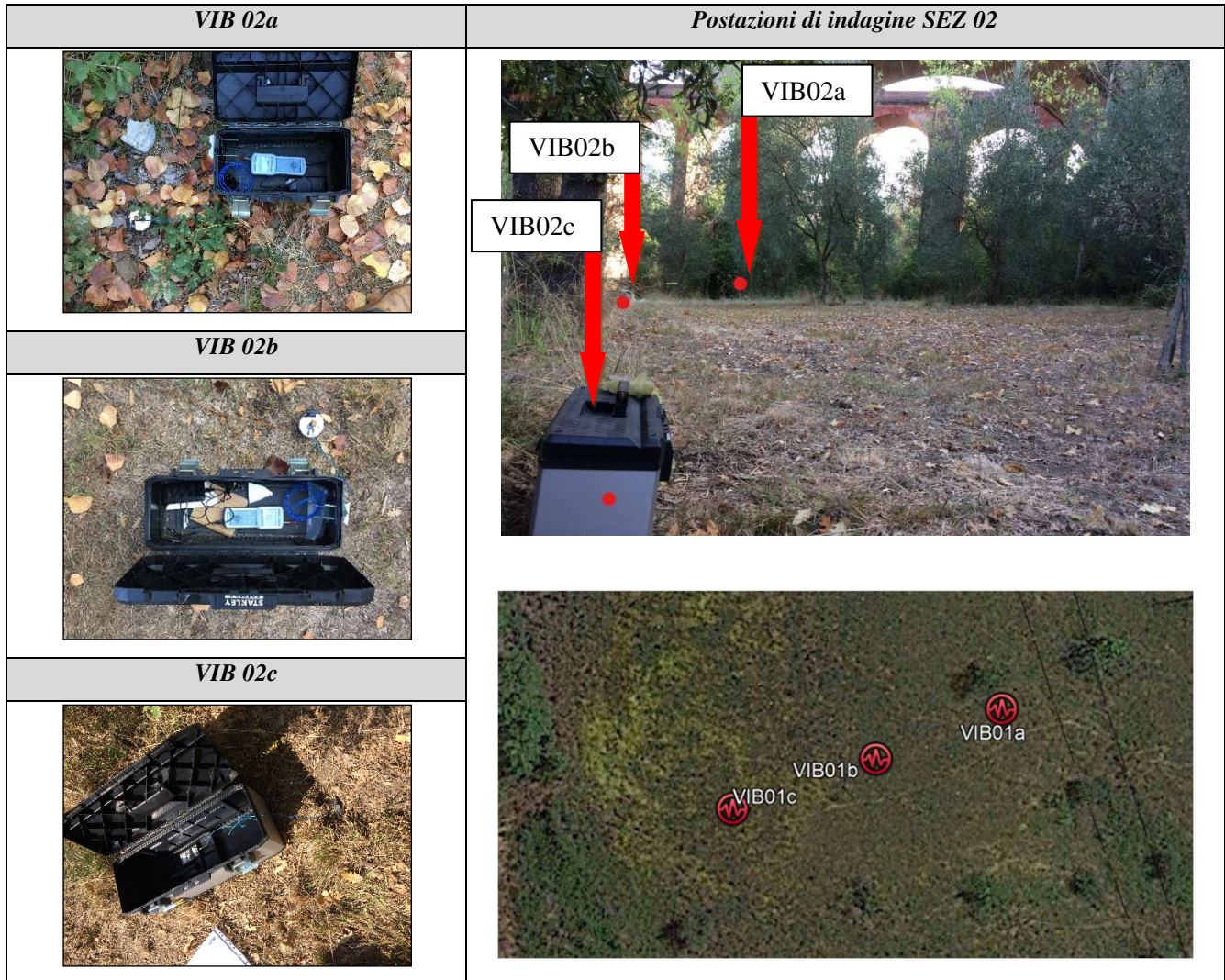
Identificazione Terna	Posizionamento
VIB 02a	In corrispondenza del viadotto ferroviario, a circa 3 metri dal binario più esterno
VIB 02b	Area verde a margine della linea ferroviaria, a circa 15 metri dal binario più esterno
VIB 02c	Area verde a margine della linea ferroviaria, a circa 30 metri dal binario più esterno

**Tab. 3.5 - Identificazione delle terne accelerometriche e posizionamento SEZ.2**

Di seguito la planimetria con l'indicazione delle postazioni di misura presso la linea ferroviaria.



**Figura 3-13 - Ortofoto area di indagine e postazioni di misura SEZ.2**



**Figura 3-14 - Report fotografico postazioni di misura SEZ.2**

Facendo riferimento al dettaglio dei rilievi sperimentali dei transiti, riportato nell'elaborato Studio Vibrazionale – Report misure vibrazioni, si caratterizzano i valori di accelerazione emessi dalla tipologia di convoglio relativa ai treni transitati.

Di seguito il vettore complessivo medio dell'accelerazione e la deviazione standard che caratterizza le sorgenti in base ai convogli rilevati nel periodo di osservazione dell'indagine sperimentale.

**Vettore complessivo medio dell'accelerazione e la deviazione standard che caratterizza le sorgenti**

Postazione	Tipologia veicolo	numero transiti valutati <sup>3</sup>	velocità media km/h	Media a <sub>w</sub> max m/s <sup>2</sup>	Sigma scarto a <sub>w</sub> m/s <sup>2</sup>	Vimm a <sub>w,95</sub> per Sorgente m/s <sup>2</sup>
VIB 1 (3m)	IC	15	65	0,0071	0,0027	0,0119
	MRC	15	108	0,0090	0,0017	0,0120
	REG	15	63	0,0058	0,0021	0,0095
	ES	15	74	0,0038	0,0011	0,0057
VIB 2 (15m)	IC	15	65	0,0289	0,0065	0,0405
	MRC	15	108	0,0258	0,0073	0,0390
	REG	15	63	0,0189	0,0057	0,0291
	ES	15	74	0,0197	0,0061	0,0307
VIB 3 (30m)	IC	15	65	0,0012	0,0002	0,0016
	MRC	15	108	0,0013	0,0004	0,0021
	REG	15	63	0,0011	0,0002	0,0014
	ES	15	74	0,0012	0,0003	0,0018

Il vettore residuo è stato ottenuto dall'indagine sperimentale e pari ai seguenti valori:

<b>Vettore residuo misurato</b>			
Postazione	Media a <sub>w</sub> max m/s <sup>2</sup>	Sigma scarto a <sub>w</sub> m/s <sup>2</sup>	Vres a <sub>w,95</sub> m/s <sup>2</sup>
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	0,0003	0,0001	0,0006
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	0,0006	0,0001	0,0008
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	0,0007	0,0001	0,0009

Per effettuare la verifica del modello della sorgente ferroviaria si è proceduto, a partire dalla caratterizzazione della sorgente ferroviaria per tipologia di convoglio, al calcolo del vettore sorgente del periodo di indagine (che non coincide necessariamente con il periodo diurno e/o notturno essendo la sorgente sempre la stessa indipendentemente dal periodo che si considera) ed a confrontarlo con il vettore sorgente ottenuto dalla misura.

Il vettore immissione (complessivo di tutti i transiti) misurato dall'indagine sperimentale è pari ai seguenti valori:

<b>Vettore immissione misurato</b>			
Postazione	Media a <sub>w</sub> max m/s <sup>2</sup>	Sigma scarto a <sub>w</sub> m/s <sup>2</sup>	Vimm a <sub>w,95</sub> m/s <sup>2</sup>
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	0,0064	0,0027	0,0113
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	0,0233	0,0077	0,0371
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	0,0012	0,0003	0,0018

<sup>3</sup> Il numero dei transiti valutati corrisponde a quelli rilevati e/o quelli minimi previsti dalla UNI 9614:2017 adottando le indicazioni della norma per l'identificazione degli eventi al fine del raggiungimento del numero minimo richiesto per la valutazione



Il vettore immissione calcolato partendo dalla caratterizzazione della sorgente (considerando la stessa velocità e numero di transiti) si determina pari a:

Vettore immissione calcolato			
Postazione	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vimm $a_w,95$ $m/s^2$
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	0,0064	0,0019	0,0098
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	0,0233	0,0042	0,0309
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	0,0012	0,0001	0,0014

Ne consegue la determinazione del Vettore Sorgente nel caso di Vettore Immissione misurato e Vettore Immissione calcolato.

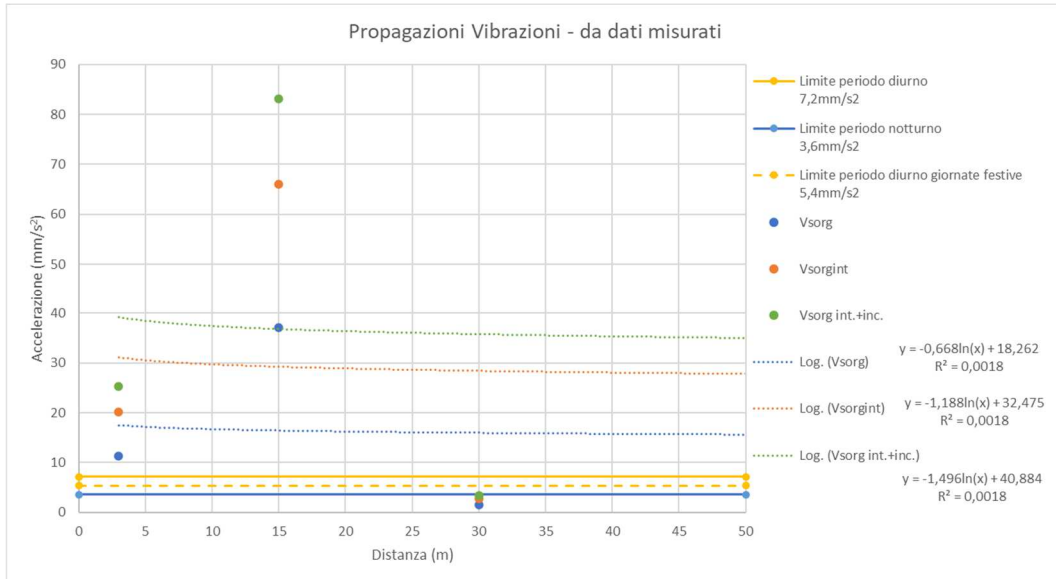
Vettore sorgente			
Postazione	Vettore sorgente calcolato $mm/s^2$	Vettore sorgente misurato $mm/s^2$	Differenza tra calcolato e misurato $mm/s^2$
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	9,8	11,3	-1,5
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	30,9	37,1	-6,3
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	1,1	1,5	-0,5

Dall'analisi dei valori si riscontra una sottostima del vettore sorgente calcolato rispetto a quello misurato. Per questo si procederà ad inserire un fattore correttivo che permetterà di tarare il modello e conseguentemente la funzione di trasferimento.

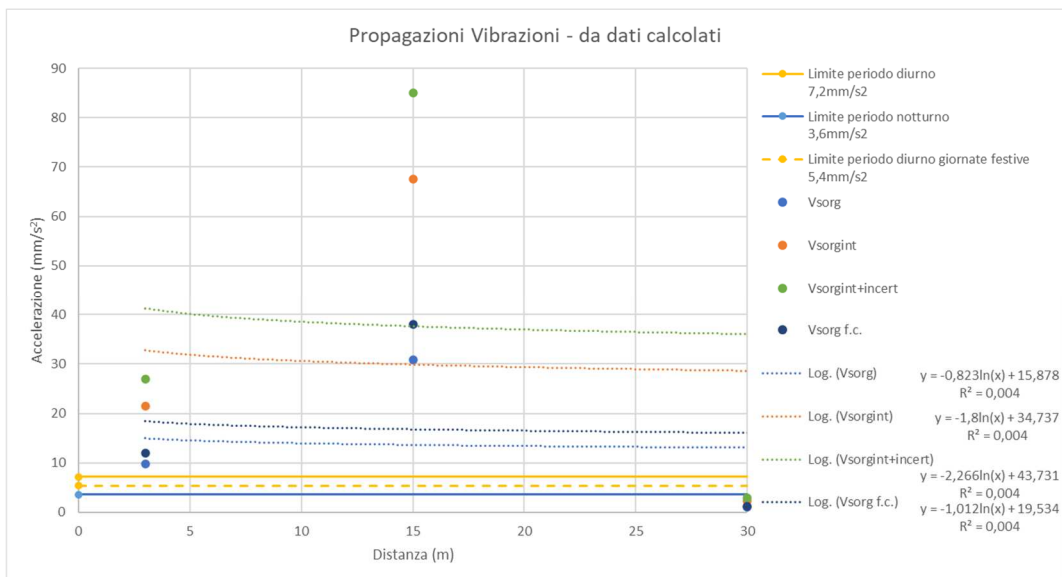
Vettore sorgente – individuazione fattore correttivo					
Postazione	Vettore sorgente calcolato $mm/s^2$	Fattore correttivo dB	Vettore sorgente calcolato corretto $mm/s^2$	Vettore sorgente misurato $mm/s^2$	Differenza tra calcolato e misurato $mm/s^2$
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	9,8	1,8	12,1	11,3	+0,75
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	30,9		38,0	37,1	+0,84
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	1,1		1,3	1,5	-0,24

In base all'applicazione del fattore correttivo si riscontrano uno scostamento tra valori calcolati e valori misurati da -0,24  $mm/s^2$  a +0,84  $mm/s^2$ .

Al fine della determinazione della propagazione delle vibrazioni nel terreno e all'interno degli edifici compresa l'incertezza del modello si provvederà a determinare la funzione di trasferimento a mezzo di regressione logaritmica determinata sia dai dati misurati che dai dati calcolati ai quali è stato applicato il fattore correttivo.



**Figura 3-15 – Funzione di trasferimento ottenuta da dati misurati per la SEZ.2**



**Figura 3-16 – Funzione di trasferimento ottenuta da dati predetti per la SEZ.2**

In base alle funzioni di regressione determinate dai set di dati di input considerati, al fine di valutarne l'eventuale scostamento, si riporta di seguito la tabella di confronto. I dati riportati di seguito fanno riferimento al periodo di acquisizione dei dati sperimentali e non al periodo diurno o notturno; essi hanno lo scopo di verificare lo scostamento delle predizioni usando le regressioni derivanti o da dati misurati o da dati predetti al fine di validare quest'ultimi.

Valutazione della funzione di trasferimento di propagazione delle vibrazioni nel terreno

Distanza (x) m	funzione di propagazione basata su dati calcolati (+f.c.) $y=-1,012\ln(x)+19,534$	funzione di propagazione basata su dati misurati $y=-1,829\ln(x)+13,536$	Differenza tra calcolato e misurato mm/s <sup>2</sup>
	Vsorg f.c. - mm/s <sup>2</sup>	Vsorg - mm/s <sup>2</sup>	
3	18,4	17,5	+0,9
15	16,8	16,5	+0,3
30	16,1	16,0	+0,1

Valutazione della funzione di trasferimento di propagazione delle vibrazioni considerando l'amplificazione degli edifici (+5dB) e l'incertezza del modello (+2dB)

Distanza (x) m	funzione di propagazione basata su dati calcolati $y=-2,266\ln(x)+43,731$	funzione di propagazione basata su dati misurati $y=-1,496\ln(x)+40,884$	Differenza tra calcolato e misurato mm/s <sup>2</sup>
	Vsorg f.c. - mm/s <sup>2</sup>	Vsorg - mm/s <sup>2</sup>	
3	41,2	39,2	+2,0
15	37,6	36,8	+0,8
30	36,0	35,8	+0,2

Come si riscontra dal confronto fra la predizione ottenuta da dati calcolati a cui è applicato il fattore correttivo e la predizione della funzione di trasferimento ottenuta dai dati misurati si valuta uno scostamento tra valori calcolati e valori misurati tra +0,1 mm/s<sup>2</sup> e +0,9 mm/s<sup>2</sup> nel caso della funzione di trasferimento nel terreno; valori tra +0,2 mm/s<sup>2</sup> e +2,0 mm/s<sup>2</sup> nel caso della funzione di trasferimento che considera l'amplificazione negli edifici e l'incertezza modellistica.

Al fine dell'applicazione del modello definito in precedenza si deve valutare l'eventuale differenza tra il sito di indagine sperimentale, il quale ha permesso la definizione del modello e l'inserimento del tracciato nel reale contesto geologico. In questo caso dalla valutazione geologica effettuata e considerando che l'indagine sperimentale è stata eseguita in prossimità di opere civili rilevanti non si riscontrano tali singolarità e/o condizioni da far inserire fattori di variazioni del modello per differenze del territorio.

Per determinare la bontà del modello si procede ad eseguire la valutazione del parametro statistico R quadro. La valutazione dei dati sperimentali e quelli definiti dalle regressioni hanno definito delle funzioni di trasferimento con valore di R quadro prossimo a zero.

Si ricorda che R quadro prossimo a 0 indica un modello le cui variabili predittive non spiegano la variabilità della y intorno alla sua media, mentre un R quadro prossimo a 1 indica un modello le cui variabili indipendenti riescono a predire completamente la variabilità della y intorno alla sua media.

Pertanto, il valore ottenuto di R quadro non si ritiene accettabile considerando le multi-variabili che sono presenti nella propagazione delle vibrazioni in un terreno individuato come omogeneo, il quale dovrebbero indurre variazioni della propagazione delle vibrazioni nel suo percorso di allontanamento dalla sorgente facendole progressivamente diminuire.

Come si può dedurre dai risultati complessivi relativi alle indagini condotte sono stati registrati dei livelli di accelerazione, che non procedono in modo decrescente rispetto alla distanza dal binario tra la terna di misura vicino alla linea ferroviaria (a 3 m) e quella nella postazione intermedia (a 15 m). Questo risultato può essere stato determinato da caratteristiche imprevedibili e non prevedibili del terreno sottostante nonché dalle caratteristiche e/o singolarità presenti. Allontanandosi dalla linea ferroviaria, si riscontra tra la posizione intermedia (a 15 m) e la postazione di indagine più lontana (a 30m), valori che hanno un andamento decrescente con una tendenza a ridursi notevolmente.

In considerazione di quanto emerso dalla valutazione del parametro R quadro si ritiene il modello tarato, ma non idoneo per la valutazione per la valutazione della propagazione delle vibrazioni in corrispondenza dell'opera in progetto. Si procederà pertanto alla determinazione dei valori di propagazione e conseguentemente della funzione di trasferimento delle vibrazioni tra i dati ritenuti validi della sezione in viadotto e quelli ottenuti per via proporzionale con i dati sperimentali definiti per la sezione in rilevato, la quale è ritenuta rappresentativa di un modello tarato e idoneo alla rappresentazione del fenomeno fisico in studio (§. 3.3.1.3).

Di seguito si riporta la caratterizzazione dei convogli ferroviari nella sezione in rilevato.

<b>Caratterizzazione dei convogli del rilevato</b>				
Distanza (m)	V <sub>imm</sub> (mm/s <sup>2</sup> )			
	IC V <sub>imm</sub>	ES V <sub>imm</sub>	MRC V <sub>imm</sub>	REG V <sub>imm</sub>
6	51,4	26,3	34,0	33,4
11	16,9	9,1	11,8	10,6
16	13,1	7,0	7,4	8,3
Velocità media (km/h)	107	102	95	83

Definendo la funzione di trasferimento del V<sub>imm</sub> della caratterizzazione dei convogli nella sezione in rilevato si determinano le emissioni per la sezione in viadotto alle distanze considerate. Inoltre, tale caratterizzazione si definisce considerando la variazione delle velocità rilevate in rilevato a quelle del viadotto ottenendo la tabella seguente.

**Caratterizzazione dei convogli del rilevato portato alle postazioni e alle velocità dell'indagine in viadotto**

Distanza (m)	Vimm (mm/s <sup>2</sup> )			
	IC Vimm	ES Vimm	MRC Vimm	REG Vimm
3	59,9	33,5	55,4	43,7
11	18,7	10,7	16,6	13,4
16	6,8	4,1	5,4	4,7
Velocità media (km/h)	65	74	108	63

In riferimento alle indagini in viadotto si considera l'indagine nelle postazioni prossima al tracciato in galleria (postazione a 3m) per definire la proporzionalità alle altre distanze (11m e 16m), in base a quanto elaborato dalla propagazione del rilevato riportato si ottiene quanto segue:

**Caratterizzazione dei convogli su viadotto proporzionalmente alla propagazione in rilevato**

Distanza (m)	Vimm (mm/s <sup>2</sup> )			
	IC Vimm	ES Vimm	MRC Vimm	REG Vimm
3	11,9	5,7	12,0	9,5
11	3,7	1,8	3,6	2,9
16	1,4	0,7	1,2	1,0
Velocità media (km/h)	65	74	108	63

La precedente caratterizzazione sarà impiegata per definire la funzione di trasferimento delle vibrazioni. La taratura della funzione sarà eseguita sulla postazione di misura della sezione in viadotto prossima ai binari, in quanto ritenuta valida e quindi possibile il confronto tra dato misurato e dato stimato.

Il vettore immissione (complessivo di tutti i transiti) misurato dall'indagine sperimentale è pari ai seguenti valori. L'indagine nella seconda e terza postazione non saranno considerate per quanto già esposto.

**Vettore immissione misurato**

Postazione	Media $a_w$ max m/s <sup>2</sup>	Sigma scarto $a_w$ m/s <sup>2</sup>	Vimm $a_w,95$ m/s <sup>2</sup>
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	0,0064	0,0027	0,0113
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	0,0233	0,0077	0,0371
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	0,0012	0,0003	0,0018

Il vettore immissione calcolato partendo dalla caratterizzazione della sorgente (considerando la stessa velocità e numero di transiti) dalla valutazione proporzionale con il rilevato si determina pari a:

**Vettore immissione calcolato**

Postazione	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vimm $a_w,95$ $m/s^2$
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	0,0064	0,0019	0,0098
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	0,0030	0,0008	0,0044
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	0,0011	0,0002	0,0015

Ne consegue la determinazione del Vettore Sorgente nel caso di Vettore Immissione misurato e Vettore Immissione calcolato.

**Vettore sorgente**

Postazione	Vettore sorgente calcolato $mm/s^2$	Vettore sorgente misurato $mm/s^2$	Differenza tra calcolato e misurato $mm/s^2$
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	9,8	11,3	-1,5
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	4,3	<i>misura scartata</i>	<i>non determinabile</i>
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	1,4	<i>misura scartata</i>	<i>non determinabile</i>

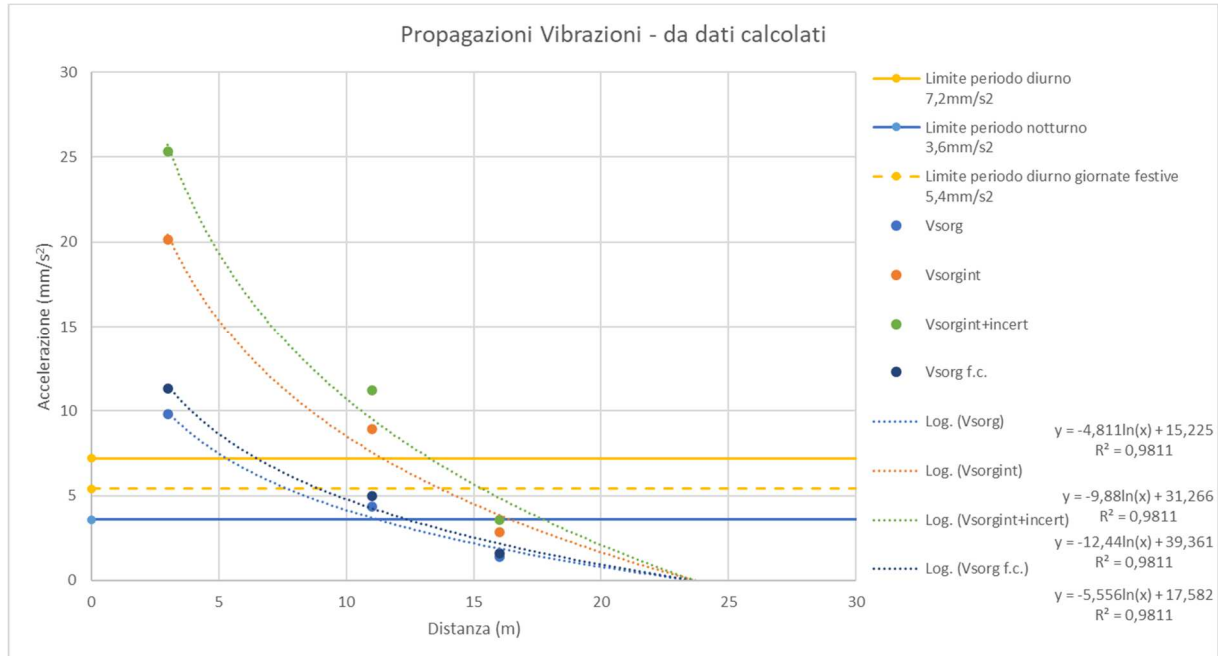
Dall'analisi dei valori si riscontra una sottostima del vettore sorgente calcolato rispetto a quello misurato. Per questo si procederà ad inserire un fattore correttivo che permetterà di tarare il modello e conseguentemente la funzione di trasferimento.

**Vettore sorgente – individuazione fattore correttivo**

Postazione	Vettore sorgente calcolato $mm/s^2$	Fattore correttivo dB	Vettore sorgente calcolato corretto $mm/s^2$	Vettore sorgente misurato $mm/s^2$	Differenza tra calcolato e misurato $mm/s^2$
VIB 1 – 3m dall'asse del binario	9,8	1,25	11,3	11,3	+0,01
VIB 2 – 15m dall'asse del binario	4,3		5,0	m.s.	n. d.
VIB 3 – 30m dall'asse del binario	1,4		1,6	m.s.	n. d.

In base all'applicazione del fattore correttivo si riscontano uno scostamento tra valore calcolato e valore misurati nella misura di riferimento di +0,01  $mm/s^2$ .

Al fine della determinazione della propagazione delle vibrazioni nel terreno e all'interno degli edifici compresa l'incertezza del modello si provvederà a determinare la funzione di trasferimento a mezzo di regressione logaritmica determinata sui dati calcolati ai quali è stato applicato il fattore correttivo.



**Figura 3-17 – Funzione di trasferimento ottenuta da dati predetti per la SEZ.2 (viadotto) a seguito della determinazione proporzionale con l'indagine nella SEZ.3 (rilevato)**

La funzione di propagazione basata su dati calcolati (+f.c.) relativa alla valutazione della funzione di trasferimento di propagazione delle vibrazioni nel terreno è pari a  $y = -9,88\ln(x) + 31,266$  con R quadro pari a 0,98. La funzione di propagazione basata su dati calcolati relativa alla valutazione della funzione di trasferimento di propagazione delle vibrazioni considerando l'amplificazione degli edifici (+5dB) e l'incertezza del modello (+2dB) è pari a  $y = -12,44\ln(x) + 39,361$  con R quadro pari a 0,98.

Per determinare la bontà del modello si procede ad eseguire la valutazione del parametro statistico R quadro. La valutazione dei dati sperimentali e quelli definiti dalle regressioni hanno definito delle funzioni di trasferimento con valore di R quadro di 0,98. Si ricorda che R quadro prossimo a 0 indica un modello le cui variabili predittive non spiegano la variabilità della y intorno alla sua media, mentre un R quadro prossimo a 1 indica un modello le cui variabili indipendenti riescono a predire completamente la variabilità della y intorno alla sua media.

Pertanto, il valore ottenuto di R quadro si ritiene accettabile considerando le multi-variabili che sono presenti nella propagazione delle vibrazioni in un terreno individuato come omogeneo, il quale dovrebbero indurre variazioni della propagazione delle vibrazioni nel suo percorso di allontanamento dalla sorgente facendole progressivamente diminuire.

In considerazione di quanto ottenuto si ritiene il modello tarato e cautelativo per la valutazione della propagazione delle vibrazioni in corrispondenza dell'opera in progetto.

	<b>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>LOTTO 1 BATTIPAGLIA - PRAIA</b> <b>LOTTO 1B ROMAGNANO - BUONABITACOLO</b> <b>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</b>					
	<b>Relazione Generale</b>	COMMESSA RC2A	LOTTO B1 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. C

### 3.3.1.3 Sezione 3 - Rilevato

Nella Sezione 3 la strumentazione è stata posizionata in corrispondenza di una sezione del corpo ferroviario in rilevato, lungo la via di propagazione, per complessivi tre punti di misura. I rilievi hanno interessato tutte le tipologie di treni in transito, secondo il quadro sinottico sotto riportato.

Numero di treni rilevato durante le misure nella Sezione 3	
Tipologia treni	Periodo Diurno e Notturno (osservazione dalle 16:45 del 25/10/2023 alle 16:50 del 26/10/2023)
Regionali	29
EC/IC	23
ES	23
Merci	7
Totale transiti	82

**Tab. 3.6 - Treni transitanti sulla linea – SEZ.3 – caratterizzazione corpo ferroviario in rilevato**

Le tre terne accelerometriche sono state così posizionate:

Identificazione Terna	Posizionamento
VIB 03a	In corrispondenza del rilevato, a circa 6 metri dal binario più esterno
VIB 03b	Area verde a margine della linea ferroviaria, a circa 11 metri dal binario più esterno
VIB 03c	Area verde a margine della linea ferroviaria, a circa 16 metri dal binario più esterno

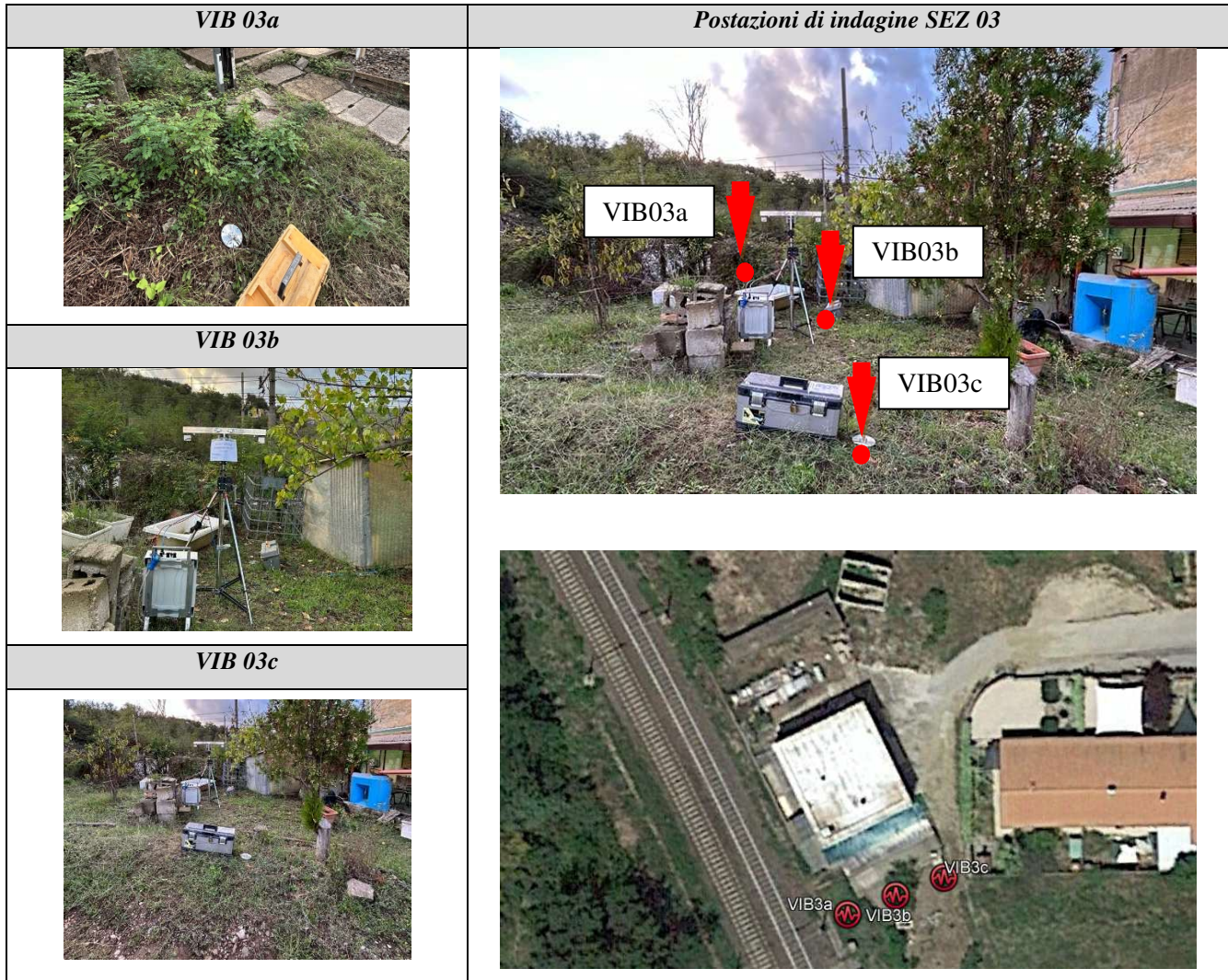
**Tab. 3.7 - Identificazione delle terne accelerometriche e posizionamento SEZ.3**

Di seguito la planimetria con l'indicazione delle postazioni di misura presso la linea ferroviaria.



**Figura 3-18 - Ortofoto area di indagine e postazioni di misura SEZ.3**





**Figura 3-19 - Report fotografico postazioni di misura SEZ.3**

Facendo riferimento al dettaglio dei rilievi sperimentali dei transiti, riportato nell'elaborato Studio Vibrazionale – Report misure vibrazioni, si caratterizzano i valori di accelerazione emessi dalla tipologia di convoglio relativa ai treni transitati.

Di seguito il vettore complessivo medio dell'accelerazione e la deviazione standard che caratterizza le sorgenti in base ai convogli rilevati nel periodo di osservazione dell'indagine sperimentale.

**Vettore complessivo medio dell'accelerazione e la deviazione standard che caratterizza le sorgenti**

Postazione	Tipologia convoglio	numero transiti valutati <sup>4</sup>	velocità media km/h	Media a <sub>w</sub> max m/s <sup>2</sup>	Sigma scarto a <sub>w</sub> m/s <sup>2</sup>	Vimm a <sub>w,95</sub> per Sorgente m/s <sup>2</sup>
VIB 1 (6m)	IC	23	107	0,0308	0,0115	0,0514
	MRC	15	95	0,0200	0,0078	0,0340
	REG	29	83	0,0210	0,0069	0,0334
	ES	23	102	0,0166	0,0054	0,0263
VIB 2 (11m)	IC	23	107	0,0105	0,0036	0,0169
	MRC	15	95	0,0076	0,0023	0,0118
	REG	29	83	0,0071	0,0019	0,0106
	ES	23	102	0,0060	0,0017	0,0091
VIB 3 (16m)	IC	23	107	0,0087	0,0025	0,0131
	MRC	15	95	0,0053	0,0012	0,0074
	REG	29	83	0,0053	0,0016	0,0083
	ES	23	102	0,0047	0,0013	0,0070

Il vettore residuo è stato ottenuto dall'indagine sperimentale e pari ai seguenti valori:

<b>Vettore residuo misurato</b>			
Postazione	Media a <sub>w</sub> max m/s <sup>2</sup>	Sigma scarto a <sub>w</sub> m/s <sup>2</sup>	Vres a <sub>w,95</sub> m/s <sup>2</sup>
VIB 1 – 6m dall'asse del binario	0,0005	0,0001	0,0007
VIB 2 – 11m dall'asse del binario	0,0005	0,0001	0,0007
VIB 3 – 16m dall'asse del binario	0,0005	0,0001	0,0007

Per effettuare la verifica del modello della sorgente ferroviaria si è proceduto, a partire dalla caratterizzazione della sorgente ferroviaria per tipologia di convoglio, al calcolo del vettore sorgente del periodo di indagine (che non coincide necessariamente con il periodo diurno e/o notturno essendo la sorgente sempre la stessa indipendentemente dal periodo che si considera) ed a confrontarlo con il vettore sorgente ottenuto dalla misura.

Il vettore immissione (complessivo di tutti i transiti) misurato dall'indagine sperimentale è pari ai seguenti valori:

<b>Vettore immissione misurato</b>			
Postazione	Media a <sub>w</sub> max m/s <sup>2</sup>	Sigma scarto a <sub>w</sub> m/s <sup>2</sup>	Vimm a <sub>w,95</sub> m/s <sup>2</sup>
VIB 1 – 6m dall'asse del binario	0,0222	0,0097	0,0397
VIB 2 – 11m dall'asse del binario	0,0077	0,0030	0,0131
VIB 3 – 16m dall'asse del binario	0,0060	0,0024	0,0103

<sup>4</sup> Il numero dei transiti valutati corrisponde a quelli rilevati e/o quelli minimi previsti dalla UNI 9614:2017 adottando le indicazioni della norma per l'identificazione degli eventi al fine del raggiungimento del numero minimo richiesto per la valutazione

Il vettore immissione calcolato partendo dalla caratterizzazione della sorgente (considerando la stessa velocità e numero di transiti) si determina pari a:

<b>Vettore immissione calcolato</b>			
<b>Postazione</b>	<b>Media <math>a_w</math> max m/s<sup>2</sup></b>	<b>Sigma scarto <math>a_w</math> m/s<sup>2</sup></b>	<b>Vimm <math>a_w,95</math> m/s<sup>2</sup></b>
VIB 1 – 6m dall'asse del binario	0,0222	0,0053	0,0317
VIB 2 – 11m dall'asse del binario	0,0077	0,0017	0,0108
VIB 3 – 16m dall'asse del binario	0,0060	0,0016	0,0089

Ne consegue la determinazione del Vettore sorgente nel caso di Vettore Immissione misurato e Vettore Immissione calcolato.

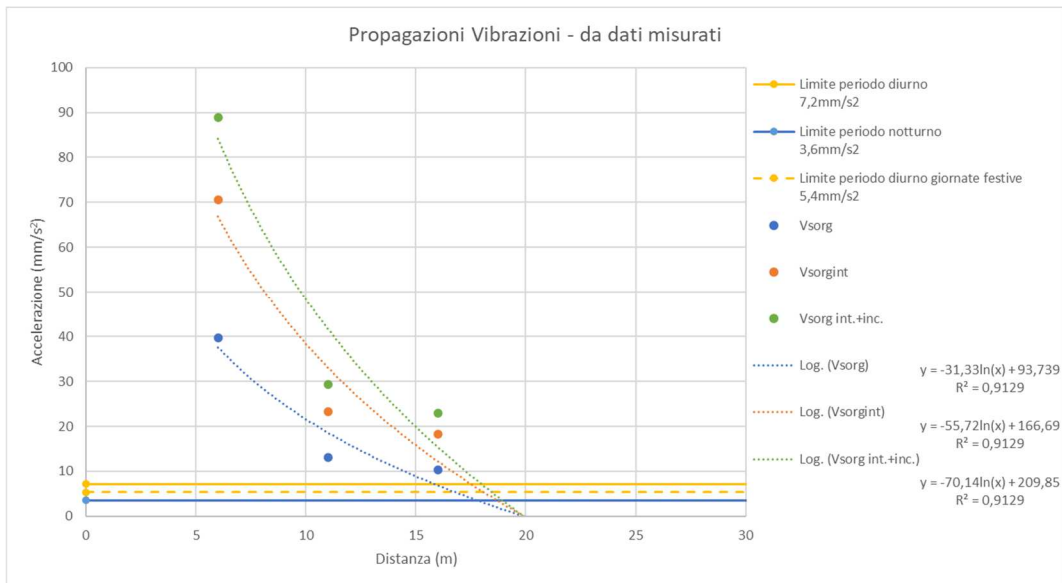
<b>Vettore sorgente</b>			
<b>Postazione</b>	<b>Vettore sorgente calcolato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Vettore sorgente misurato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Differenza tra calcolato e misurato mm/s<sup>2</sup></b>
VIB 1 – 6m dall'asse del binario	31,7	39,7	-8,0
VIB 2 – 11m dall'asse del binario	10,8	13,1	-2,4
VIB 3 – 16m dall'asse del binario	8,8	10,3	-1,4

Dall'analisi dei valori si riscontra una sottostima del vettore sorgente calcolato rispetto a quello misurato. Per questo si procederà ad inserire un fattore correttivo che permetterà di tarare il modello e conseguentemente la funzione di trasferimento.

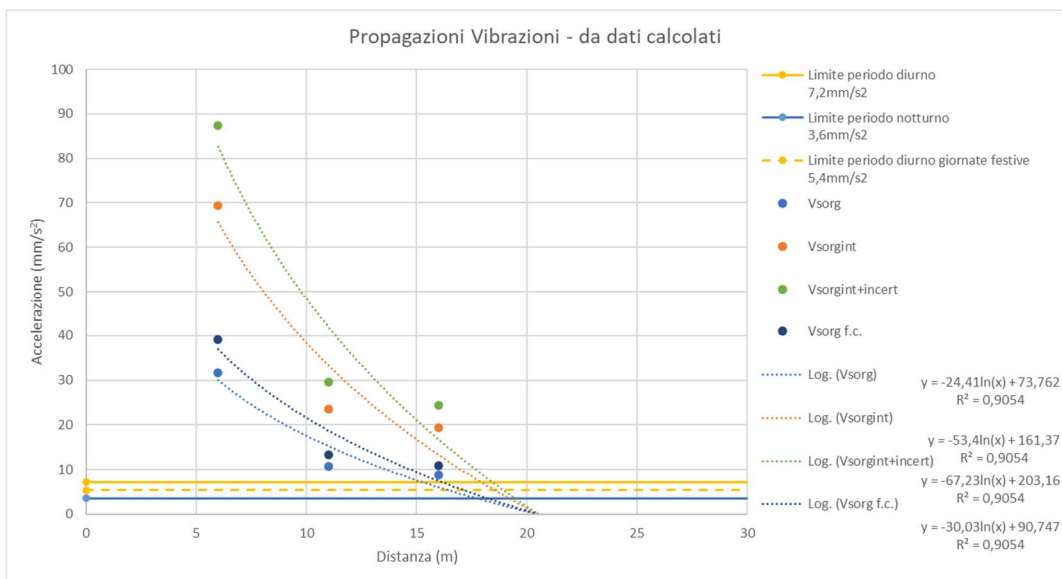
<b>Vettore sorgente – individuazione fattore correttivo</b>					
<b>Postazione</b>	<b>Vettore sorgente calcolato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Fattore correttivo dB</b>	<b>Vettore sorgente calcolato corretto mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Vettore sorgente misurato mm/s<sup>2</sup></b>	<b>Differenza tra calcolato e misurato mm/s<sup>2</sup></b>
VIB 1 – 6m dall'asse del binario	31,7	1,8	39,0	39,7	-0,65
VIB 2 – 11m dall'asse del binario	10,8		13,2	13,1	+0,11
VIB 3 – 16m dall'asse del binario	8,8		10,9	10,3	+0,63

In base all'applicazione del fattore correttivo si riscontrano uno scostamento tra valori calcolati e valori misurati da -0,65 mm/s<sup>2</sup> a +0,63 mm/s<sup>2</sup>.

Al fine della determinazione della propagazione delle vibrazioni nel terreno e all'interno degli edifici compresa l'incertezza del modello si provvedere a determinare la funzione di trasferimento a mezzo di regressione logaritmica determinata sia dai dati misurati che dai dati calcolati ai quali è stato applicato il fattore correttivo.



**Figura 3-20 – Funzione di trasferimento ottenuta da dati misurati per la SEZ.3**



**Figura 3-21 – Funzione di trasferimento ottenuta da dati predetti per la SEZ.3**

In base alle funzioni di regressione determinate dai set di dati di input considerati, al fine di valutarne l'eventuale scostamento, si riporta di seguito la tabella di confronto. I dati riportati di seguito fanno riferimento al periodo di acquisizione dei dati sperimentali e non al periodo diurno o notturno; essi hanno lo scopo di verificare lo scostamento delle predizioni usando le regressioni derivanti o da dati misurati o da dati predetti al fine di validare quest'ultimi.

Valutazione della funzione di trasferimento di propagazione delle vibrazioni nel terreno			
Distanza (x) m	funzione di propagazione basata su dati calcolati (+f.c.) $y = -30,03 \ln(x) + 90,747$	funzione di propagazione basata su dati misurati $y = -31,33 \ln(x) + 93,739$	Differenza tra calcolato e misurato mm/s <sup>2</sup>
	Vsorg f.c. - mm/s <sup>2</sup>	Vsorg - mm/s <sup>2</sup>	
6	36,9	37,6	-0,7
11	18,7	18,6	+0,1
16	7,5	10,3	+0,6

Valutazione della funzione di trasferimento di propagazione delle vibrazioni considerando l'amplificazione degli edifici (+5dB) e l'incertezza del modello (+2dB)			
Distanza (x) m	funzione di propagazione basata su dati calcolati $y = -67,23 \ln(x) + 203,16$	funzione di propagazione basata su dati misurati $y = -70,14 \ln(x) + 209,85$	Differenza tra calcolato e misurato mm/s <sup>2</sup>
	Vsorg f.c. - mm/s <sup>2</sup>	Vsorg - mm/s <sup>2</sup>	
6	82,7	128,2	-1,5
11	41,9	83,4	+0,3
16	16,8	47,8	+1,4

Come si riscontra dal confronto fra la predizione ottenuta da dati calcolati a cui è applicato il fattore correttivo e la predizione della funzione di trasferimento ottenuta dai dati misurati si valuta uno scostamento tra valori calcolati e valori misurati tra -0,7 mm/s<sup>2</sup> e +0,6 mm/s<sup>2</sup> nel caso della funzione di trasferimento nel terreno; valori tra -1,5 mm/s<sup>2</sup> e +1,4 mm/s<sup>2</sup> nel caso della funzione di trasferimento che considera l'amplificazione negli edifici e l'incertezza modellistica. Il modello quindi, in generale, sovrastima l'emissione delle vibrazioni dalla distanza di circa 6 m dal binario.

Al fine dell'applicazione del modello definito in precedenza si deve valutare l'eventuale differenza tra il sito di indagine sperimentale, il quale ha permesso la definizione del modello e l'inserimento del tracciato nel reale contesto geologico. In questo caso dalla valutazione geologica effettuata e considerando che l'indagine sperimentale è stata eseguita in prossimità di opere civili rilevanti non si riscontrano tali singolarità e/o condizioni da far inserire fattori di variazioni del modello per differenze del territorio.

Per determinare la bontà del modello si procede ad eseguire la valutazione del parametro statistico R quadro. La valutazione dei dati sperimentali e quelli definiti dalle regressioni hanno definito delle funzioni di trasferimento con valore di R quadro di 0,91.

Si ricorda che R quadro prossimo a 0 indica un modello le cui variabili predittive non spiegano la variabilità della y intorno alla sua media, mentre un R quadro prossimo a 1 indica un modello le cui variabili indipendenti riescono a predire completamente la variabilità della y intorno alla sua media.

Pertanto, il valore ottenuto di R quadro si ritiene accettabile considerando le multi-variabili che sono presenti nella propagazione delle vibrazioni in un terreno individuato come omogeneo, il quale dovrebbero indurre variazioni della propagazione delle vibrazioni nel suo percorso di allontanamento dalla sorgente facendole progressivamente diminuire.

In considerazione di quanto ottenuto si ritiene il modello tarato e cautelativo per la valutazione della propagazione delle vibrazioni in corrispondenza dell'opera in progetto.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>LOTTO 1 BATTIPAGLIA - PRAIA</b> <b>LOTTO 1B ROMAGNANO - BUONABITACOLO</b> <b>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</b>					
	<b>Relazione Generale</b>	COMMESSA RC2A	LOTTO B1 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. C

### 3.4 Modello di esercizio ferroviario

Di seguito si riportano nel dettaglio i dati dell'esercizio ferroviario allo stato di progetto. In dettaglio si fornisce:

- la tipologia di convogli in transito;
- il numero di transiti relativamente al periodo diurno e notturno per le diverse categorie di convogli;
- la velocità di transito delle diverse tipologie di convoglio suddivisa in tratte.

#### 3.4.1 Modello di Esercizio di Progetto

La valutazione sarà eseguita in funzione della velocità di progetto e della tipologia di treno previsto. Di seguito si riporta la tabella con il dettaglio dei flussi di esercizio relativi alla linea di progetto:

<b>LOTTO 1B</b> <b>Tratto ROMAGNANO - BIVIO PRAJA</b>			
Tipologia	Periodo Diurno (06-22)	Periodo Notturno (06-22)	V [km/h]
AV	80	8	300
IC (LH-Etr600)	14	2	250
MERCI	24	24	100

Tab. 3.8 – Modello di Esercizio di Progetto Linea AV

### 3.5 Funzione di propagazione delle vibrazioni per lo stato progetto

Nella tratta allo stato di progetto, considerando l'ambito di intervento, si valutano sezioni del tracciato ferroviario in rilevato, viadotto e galleria.

La linea in valutazione è composta da diverse tratte nelle quali il numero dei convogli rimane lo stesso e non si riscontrano variazioni delle velocità in funzione del convoglio e della chilometrica della linea in relazione all'MdE.

In particolare, per la sezione in rilevato (RI) e/o trincea (TR); in galleria (GA e GN) e viadotto (VI) verrà valutata la situazione prevista dall'MdE di progetto indicate in precedenza, quindi, saranno analizzati le opere di esercizio che differiscono tra loro dalla tipologia di sezione ferroviaria.

### 3.5.1 Valori attesi per i tratti allo scoperto in Rilevato

La modellazione previsionale della propagazione delle vibrazioni ha permesso la definizione di una funzione di trasferimento dalla quale è possibile valutare la variazione delle vibrazioni indotte dal traffico ferroviario in relazione alla distanza dalla sorgente. Tramite la funzione di trasferimento definita sarà quindi possibile definire il valore per ogni singolo ricettore.

Periodo Diurno - Stato di progetto sezione in Rilevato											
Pos.	Tipo conv.	Nr. trans. da MdE	Veloc. trans. MdE km/h	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vimm $a_w,95$ $m/s^2$	Vres $a_w,95$ $m/s^2$	Vsorg $mm/s^2$	Vsorg f.c. (+1,8 dB) $mm/s^2$	Vsorg f.c.+ AMPL. (+5dB) $mm/s^2$	Vsorgf. c.+ AMPL +INC. (+2dB) $mm/s^2$
VIB 1 6m	IC	14	250	0,0291	0,0073	0,0422	0,0007	42,2	51,9	92,3	116,2
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	80	300								
VIB 2 11m	IC	14	250	0,0105	0,0023	0,0145	0,0007	14,5	17,8	31,7	39,9
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	80	300								
VIB 3 16m	IC	14	250	0,0081	0,0022	0,0120	0,0007	12,0	14,7	26,2	33,0
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	80	300								

Periodo Notturno - Stato di progetto sezione in Rilevato											
Pos.	Tipo conv.	Nr. trans. da MdE	Veloc. trans. MdE km/h	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vimm $a_w,95$ $m/s^2$	Vres $a_w,95$ $m/s^2$	Vsorg $mm/s^2$	Vsorg f.c. (+1,8 dB) $mm/s^2$	Vsorg f.c.+ AMPL. (+5dB) $mm/s^2$	Vsorgf. c.+ AMPL +INC. (+2dB) $mm/s^2$
VIB 1 6m	IC	2	250	0,0240	0,0067	0,0360	0,0007	35,9	44,2	78,6	99,0
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	8	300								
VIB 2 11m	IC	2	250	0,0089	0,0021	0,0126	0,0007	12,6	15,5	27,5	34,6
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	8	300								

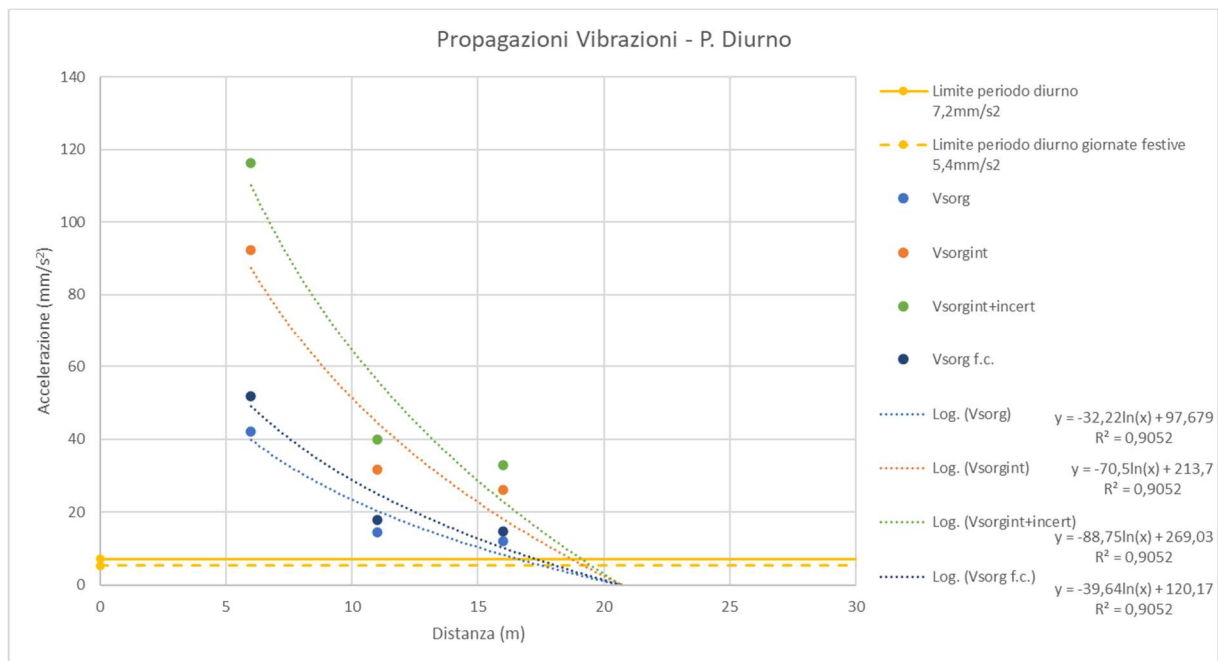


**Relazione Generale**

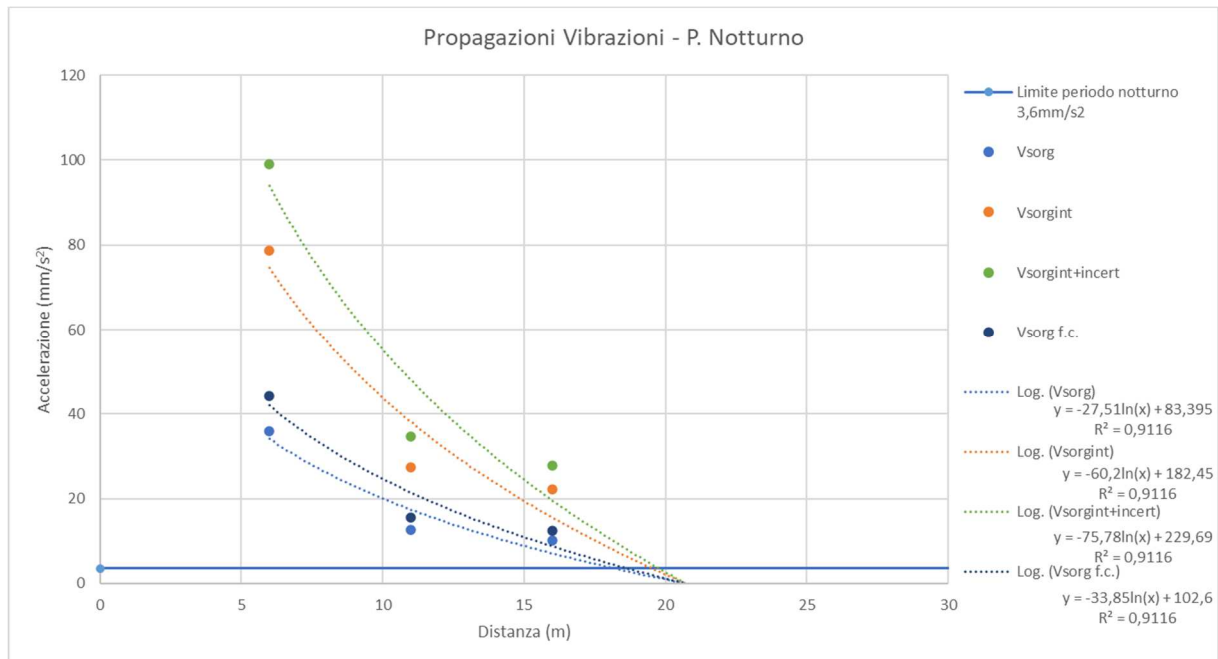
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RC2A	B1 R 22	RG	IM0004 002	C	73 di 90

**Periodo Notturno - Stato di progetto sezione in Rilevato**

Pos.	Tipo conv.	Nr. trans. da MdE	Veloc. trans. MdE km/h	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vimm $a_w,95$ $m/s^2$	Vres $a_w,95$ $m/s^2$	Vsorg $mm/s^2$	Vsorg f.c. (+1,8 dB) $mm/s^2$	Vsorg f.c.+ AMPL. (+5dB) $mm/s^2$	Vsorgf. c.+ AMPL +INC. (+2dB) $mm/s^2$
VIB 3 16m	IC	2	250	0,0065	0,0020	0,0101	0,0007	10,1	12,4	22,1	27,8
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	8	300								



La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo diurno comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello risulta essere  $y = -88,75\ln(x) + 269,03$  (R quadro 0,91).



La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo notturno comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello risulta essere  $y = -75,78 \ln(x) + 229,69$  (R quadro 0,91).

Nella tabella seguente si propone la variazione delle vibrazioni immesse in funzione della distanza dalla linea. Le celle, se evidenziate, indicano il superamento o del limite diurno ( $7,2 \text{ mm/s}^2$ ) o del limite notturno ( $3,6 \text{ mm/s}^2$ ) per la destinazione d'uso abitazione.

Distanza m	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Diurno mm/s <sup>2</sup>	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Notturmo mm/s <sup>2</sup>
1	269,0	229,7
2	207,5	177,2
3	171,5	146,4
4	146,0	124,6
5	126,2	107,7
6	110,0	93,9
7	96,3	82,2
8	84,5	72,1
9	74,0	63,2
10	64,7	55,2

Distanza m	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Diurno mm/s <sup>2</sup>	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Notturno mm/s <sup>2</sup>
11	56,2	48,0
12	48,5	41,4
13	41,4	35,3
14	34,8	29,7
15	28,7	24,5
16	23,0	19,6
17	17,6	15,0
18	12,5	10,7
19	7,7	6,6
20	3,2	2,7
25	0	0
50	0	0

**La distanza limite per il rispetto del limite diurno e notturno è pari a circa 20m.**

Il valore del vettore sorgente è definito all'interno dell'edificio, considera l'amplificazione delle vibrazioni a causa della vibrazione della struttura e la somma dell'incertezza associata al modello.

Per questa tipologia di opera non risultano presenti ricettori, quindi non è possibile definire valori puntuali. Non risultano pertanto situazioni da segnalare.

### 3.5.2 Valori attesi per i tratti al coperto in Galleria

La modellazione previsionale della propagazione delle vibrazioni ha permesso la definizione di una funzione di trasferimento dalla quale è possibile valutare la variazione delle vibrazioni indotte dal traffico ferroviario in relazione alla distanza dalla sorgente. Tramite la funzione di trasferimento definita sarà quindi possibile definire il valore per ogni singolo ricettore.

Periodo Diurno - Stato di progetto sezione in Galleria											
Pos.	Tipo conv.	Nr. trans. da MdE	Veloc. trans. MdE km/h	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vimm $a_w,95$ $m/s^2$	Vres $a_w,95$ $m/s^2$	Vsorg $mm/s^2$	Vsorg f.c. (+3 dB) $mm/s^2$	Vsorg f.c.+ AMPL. (+5dB) $mm/s^2$	Vsorgf. c.+ AMPL +INC. (+2dB) $mm/s^2$
VIB 1 3m	IC	14	250	0,0087	0,0012	0,0109	0,0009	10,9	15,4	27,3	34,4
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	80	300								
VIB 2 11m	IC	14	250	0,0045	0,0006	0,0055	0,0008	5,5	7,7	13,7	17,3
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	80	300								
VIB 3 16m	IC	14	250	0,0017	0,0002	0,0021	0,0008	1,9	2,7	4,9	6,1
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	80	300								

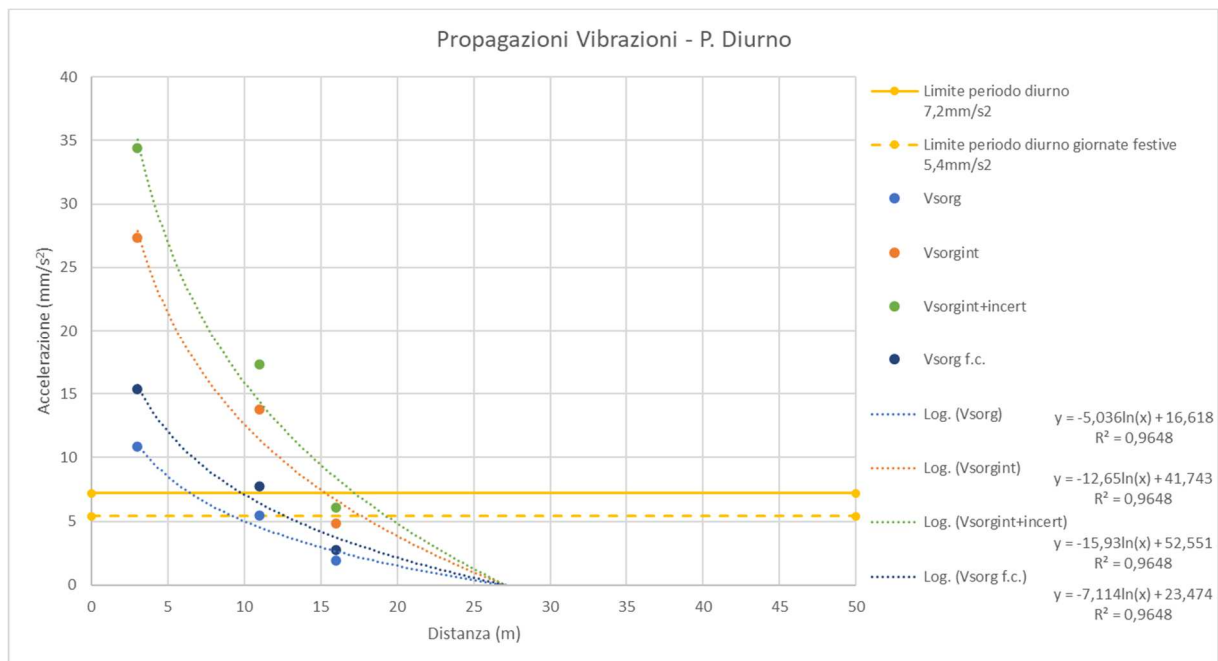
Periodo Notturno - Stato di progetto sezione in Galleria											
Pos.	Tipo conv.	Nr. trans. da MdE	Veloc. trans. MdE km/h	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vimm $a_w,95$ $m/s^2$	Vres $a_w,95$ $m/s^2$	Vsorg $mm/s^2$	Vsorg f.c. (+3 dB) $mm/s^2$	Vsorg f.c.+ AMPL. (+5dB) $mm/s^2$	Vsorgf. c.+ AMPL +INC. (+2dB) $mm/s^2$
VIB 1 3m	IC	2	250	0,0076	0,0012	0,0098	0,0009	9,8	13,8	24,6	30,9
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	8	300								
VIB 2 11m	IC	2	250	0,0042	0,0005	0,0051	0,0008	5,0	7,1	12,6	15,9
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	8	300								

**Relazione Generale**

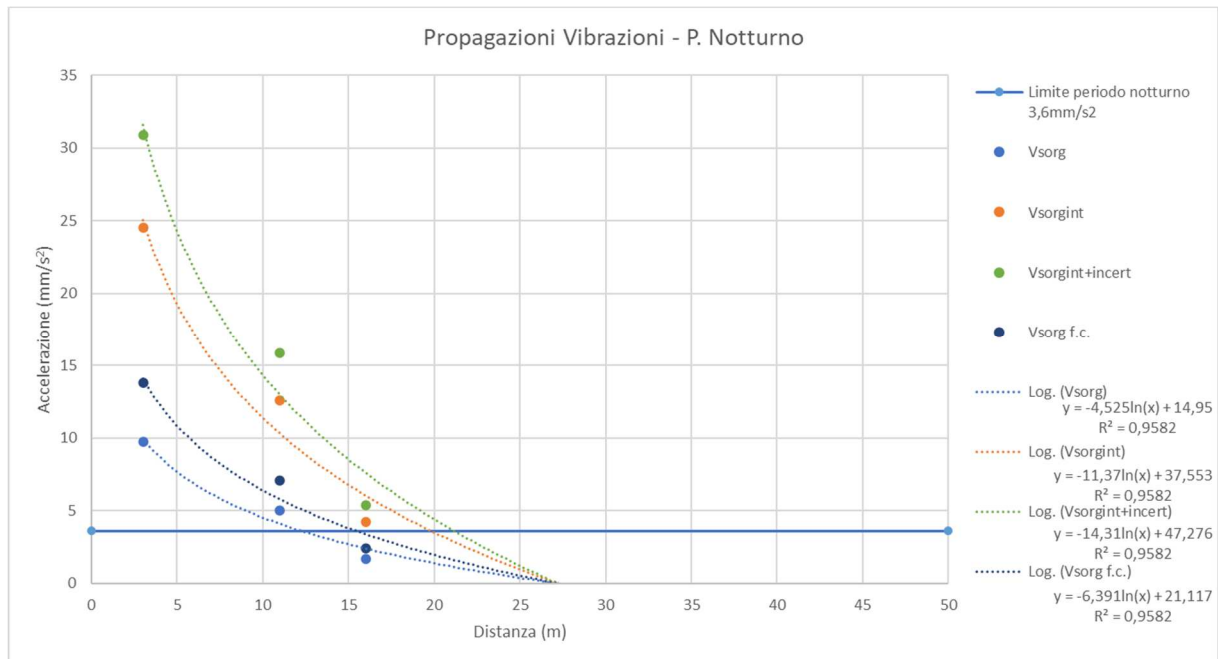
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RC2A	B1 R 22	RG	IM0004 002	C	77 di 90

**Periodo Notturno - Stato di progetto sezione in Galleria**

Pos.	Tipo conv.	Nr. trans. da MdE	Veloc. trans. MdE km/h	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vimm $a_w,95$ $m/s^2$	Vres $a_w,95$ $m/s^2$	Vsorg $mm/s^2$	Vsorg f.c. (+3 dB) $mm/s^2$	Vsorg f.c.+ AMPL. (+5dB) $mm/s^2$	Vsorgf. c.+ AMPL. +INC. (+2dB) $mm/s^2$
VIB 3 16m	IC	2	250	0,0015	0,0002	0,0019	0,0008	1,7	2,4	4,3	5,4
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	8	300								



La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo diurno comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello risulta essere  $y = -15,93\ln(x) + 52,551$  (R quadro 0,96).



La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo notturno comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello risulta essere  $y = -14,31 \ln(x) + 47,276$  (R quadro 0,96).

Nella tabella seguente si propone la variazione delle vibrazioni immesse in funzione della distanza dalla linea. Le celle, se evidenziate, indicano il superamento o del limite diurno ( $7,2 \text{ mm/s}^2$ ) o del limite notturno ( $3,6 \text{ mm/s}^2$ ) per la destinazione d'uso abitazione.

Distanza m	Vsorg (amplif. interna + incert.)	
	Periodo Diurno $\text{mm/s}^2$	Periodo Notturno $\text{mm/s}^2$
1	52,6	47,3
2	41,5	37,4
3	35,1	31,6
4	30,5	27,4
5	26,9	24,2
6	24,0	21,6
7	21,6	19,4
8	19,4	17,5
9	17,5	15,8
10	15,9	14,3

Distanza m	Vsorg (amplif. interna + incert.)	
	Periodo Diurno mm/s <sup>2</sup>	Periodo Notturno mm/s <sup>2</sup>
11	14,4	13,0
12	13,0	11,7
13	11,7	10,6
14	10,5	9,5
15	9,4	8,5
16	8,4	7,6
17	7,4	6,7
18	6,5	5,9
19	5,6	5,1
20	4,8	4,4
25	1,3	1,2
50	0	0

**La distanza limite per il rispetto del limite diurno è pari a circa 18 e il limite notturno è pari a circa 22m.**

Il valore del vettore sorgente è definito all'interno dell'edificio, considera l'amplificazione delle vibrazioni a causa della vibrazione della struttura e la somma dell'incertezza associata al modello.

Di seguito il valore puntuale ai ricettori considerati nel censimento ricettori ed appartenenti all'ambito di studio del progetto. Dall'analisi dei valori predetti ai ricettori si riscontrano come non rilevanti; non sono presenti quindi criticità, risultando valori conformi al limite diurno e notturno previsti dalla UNI 9614:2017.

ric.	destinazione d'uso	distanza dal binario più prossimo [m]	ricopertura [m]	pk BP	pk BD	Tipologia Opera	Comune	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Diurno mm/s <sup>2</sup>	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Notturno mm/s <sup>2</sup>	Limite UNI 9614:2017 Diu / Not mm/s <sup>2</sup>
1008	residenziale	19	34		2+036	galleria	Buccino	0	0	7,2 / 3,6
1009	residenziale	13	33		2+059	galleria	Buccino	0	0	7,2 / 3,6
9002	residenziale	8	75	2+250		galleria	Buccino	0	0	7,2 / 3,6
1010	residenziale	2	64		2+788	galleria	Buccino	0	0	7,2 / 3,6
9004	residenziale	23	83	3+620		galleria	Buccino	0	0	7,2 / 3,6

**Relazione Generale**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RC2A	B1 R 22	RG	IM0004 002	C	80 di 90

ric.	destinazione d'uso	distanza dal binario più prossimo [m]	ricopertura [m]	pk BP	pk BD	Tipologia Opera	Comune	Vsorg (amplif. interna + incert.) <b>Periodo Diurno</b> mm/s <sup>2</sup>	Vsorg (amplif. interna + incert.) <b>Periodo Notturno</b> mm/s <sup>2</sup>	Limite UNI 9614:2017 Diu / Not mm/s <sup>2</sup>
9005	commerciale	7	37	4+627		galleria	Buccino	0	0	14
9006	commerciale	22	37	4+634		galleria	Buccino	0	0	14
9007	residenziale	27	31	4+677		galleria	Buccino	0	0	7,2 / 3,6
9009	residenziale	2	78	7+035		galleria	Buccino	0	0	7,2 / 3,6
9011	residenziale	20	84	21+050		galleria	Polla	0	0	7,2 / 3,6
9013	residenziale	7	43	21+284		galleria	Polla	0	0	7,2 / 3,6



### 3.5.3 Valori attesi per i tratti allo scoperto in Viadotto

La modellazione previsionale della propagazione delle vibrazioni ha permesso la definizione di una funzione di trasferimento dalla quale è possibile valutare la variazione delle vibrazioni indotte dal traffico ferroviario in relazione alla distanza dalla sorgente. Tramite la funzione di trasferimento definita sarà quindi possibile definire il valore per ogni singolo ricettore.

#### Periodo Diurno - Stato di progetto sezione in Viadotto

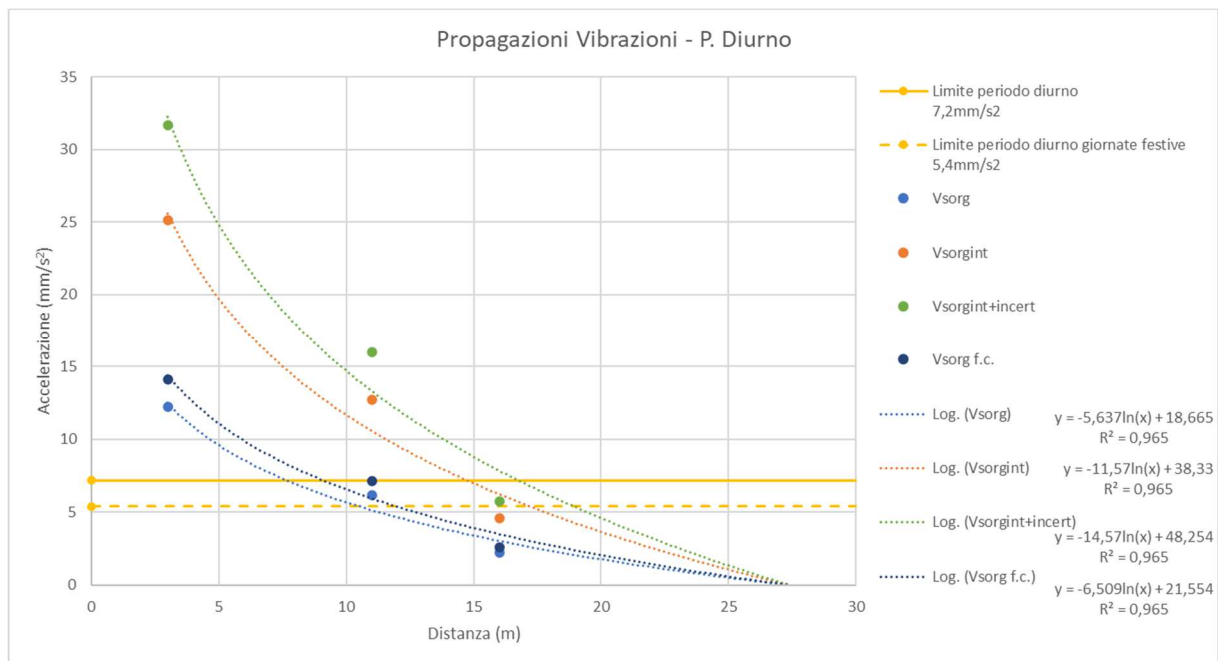
Pos.	Tipo conv.	Nr. trans. da MdE	Veloc. trans. MdE km/h	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vimm $a_w,95$ $m/s^2$	Vres $a_w,95$ $m/s^2$	Vsorg $mm/s^2$	Vsorg f.c. (+1,25 dB) $mm/s^2$	Vsorg f.c.+ AMPL. (+5dB) $mm/s^2$	Vsorgf. c.+ AMPL +INC. (+2dB) $mm/s^2$
VIB 1 3m	IC	14	250	0,0086	0,0020	0,0123	0,0006	12,2	14,1	25,1	31,6
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	80	300								
VIB 2 11m	IC	14	250	0,0041	0,0012	0,0062	0,0006	6,2	7,1	12,7	16,0
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	80	300								
VIB 3 16m	IC	14	250	0,0015	0,0004	0,0023	0,0006	2,2	2,6	4,6	5,8
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	80	300								

#### Periodo Notturno - Stato di progetto sezione in Viadotto

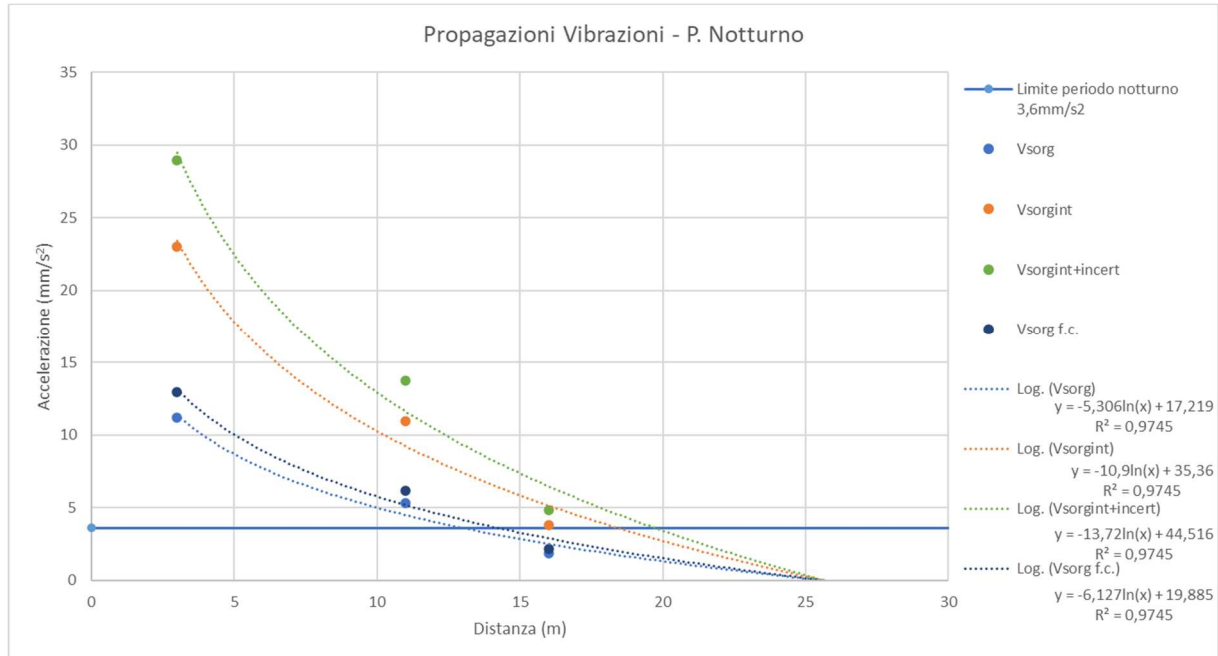
Pos.	Tipo conv.	Nr. trans. da MdE	Veloc. trans. MdE km/h	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vimm $a_w,95$ $m/s^2$	Vres $a_w,95$ $m/s^2$	Vsorg $mm/s^2$	Vsorg f.c. (+1,25 dB) $mm/s^2$	Vsorg f.c.+ AMPL. (+5dB) $mm/s^2$	Vsorgf. c.+ AMPL +INC. (+2dB) $mm/s^2$
VIB 1 3m	IC	2	250	0,0087	0,0014	0,0112	0,0006	11,2	12,9	23,0	29,0
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	8	300								
VIB 2 11m	IC	2	250	0,0037	0,0009	0,0054	0,0006	5,3	6,2	10,9	13,8
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	8	300								

**Periodo Notturno – Stato di progetto sezione in Viadotto**

Pos.	Tipo conv.	Nr. trans. da MdE	Veloc. trans. MdE km/h	Media $a_w$ max $m/s^2$	Sigma scarto $a_w$ $m/s^2$	Vimm $a_w,95$ $m/s^2$	Vres $a_w,95$ $m/s^2$	Vsorg $mm/s^2$	Vsorg f.c. (+1,25 dB) $mm/s^2$	Vsorg f.c.+ AMPL. (+5dB) $mm/s^2$	Vsorgf. c.+ AMPL +INC. (+2dB) $mm/s^2$
VIB 3 16m	IC	2	250	0,0013	0,0004	0,0019	0,0006	1,9	2,2	3,8	4,8
	MRC	24	100								
	REG	0	0								
	ES	8	300								



La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo diurno comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello risulta essere  $y = -14,57\ln(x) + 48,254$  (R quadro 0,97).



La funzione di propagazione delle vibrazioni in periodo notturno comprensiva dell'amplificazione interna e dell'incertezza associata al modello risulta essere  $y = -13,72 \ln(x) + 44,516$  (R quadro 0,97).

Nella tabella seguente si propone la variazione delle vibrazioni immesse in funzione della distanza dalla linea. Le celle se evidenziate indicano il superamento o del limite diurno ( $7,2 \text{ mm/s}^2$ ) o del limite notturno ( $3,6 \text{ mm/s}^2$ ) per la destinazione d'uso abitazione.

Distanza m	Vsorg (amplif. interna + incert.)	
	Periodo Diurno mm/s <sup>2</sup>	Periodo Notturmo mm/s <sup>2</sup>
1	48,3	44,5
2	38,2	35,0
3	32,2	29,4
4	28,1	25,5
5	24,8	22,4
6	22,1	19,9
7	19,9	17,8
8	18,0	16,0
9	16,2	14,4
10	14,7	12,9

Distanza m	Vsorg (amplif. interna + incert.)	
	Periodo Diurno mm/s <sup>2</sup>	Periodo Notturno mm/s <sup>2</sup>
11	13,3	11,6
12	12,0	10,4
13	10,9	9,3
14	9,8	8,3
15	8,8	7,4
16	7,9	6,5
17	7,0	5,6
18	6,1	4,9
19	5,4	4,1
20	4,6	3,4
25	1,4	0,4
50	0	0

**La distanza limite per il rispetto del limite diurno è pari a circa 17m e il limite notturno è pari a circa 20m.**

Il valore del vettore sorgente è definito all'interno dell'edificio, considera l'amplificazione delle vibrazioni a causa della vibrazione della struttura e la somma dell'incertezza associata al modello.

Di seguito il valore puntuale ai ricettori considerati nel censimento ricettori ed appartenenti all'ambito di studio del progetto. Dall'analisi dei valori predetti ai ricettori si riscontrano come non rilevanti; non sono presenti quindi criticità, risultando valori conformi al limite diurno e notturno previsti dalla UNI 9614:2017.

ric.	destinazione d'uso	distanza dal binario più prossimo [m]	ricopertura [m]	pk BP	pk BD	Tipologia Opera	Comune	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Diurno mm/s <sup>2</sup>	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Notturno mm/s <sup>2</sup>	Limite UNI 9614:2017 Diu / Not mm/s <sup>2</sup>
2104	residenziale	26	---	28+930		viadotto	Sala Consilina	0	0	7,2 / 3,6
2109	residenziale	26	---	29+049		viadotto	Sala Consilina	0	0	7,2 / 3,6

#### **4 PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO**

L'individuazione delle criticità che si potranno verificare con la realizzazione del progetto ha reso indispensabile determinare preventivamente i criteri di valutazione della sensibilità del territorio: a tale scopo è stato utilizzato come riferimento il censimento dei ricettori e la norma di riferimento, UNI 9614:2017, al fine di stabilirne i limiti da rispettare in funzione della tipologia di ricettore.

Applicando i modelli di calcoli precedentemente descritti e le funzioni di trasferimento sperimentali, si rileva che i valori di riferimento di cui alla norma UNI 9614:2017 sono generalmente rispettati per tutti i ricettori posti in prossimità del tracciato ferroviario. Considerando tipologie edilizie presenti e attraversamenti litologici tipici dell'area in esame rispetto a quella delle indagini sperimentale per caratterizzare il modello, si è giunti al calcolo della distanza dalla sorgente a cui il livello di accelerazione ponderato risulta inferiore ai valori di riferimento indicati dalla normativa UNI 9614:2017 per i ricettori nel periodo diurno e notturno.

In assenza di dati precisi per ciascun edificio analizzato (terreno, fondazioni, strutture) le valutazioni previsionali possono risentire di variazioni anche apprezzabili: a tal fine, nelle valutazioni conclusive si è tenuto in considerazione, in via cautelativa, di un margine di incertezza tale da rappresentare anche la variabilità dei parametri di input.

##### **4.1 Censimento dei Ricettori**

Nell'ambito delle analisi per la componente rumore è stato effettuato un dettagliato censimento dei ricettori. Tale censimento rimane valido per lo studio della componente vibrazioni.

Il censimento ha riguardato le fasce ferroviarie previste per lato a partire dal binario esterno (fascia di pertinenza acustica ai sensi del DPR 459/98) in tutti i tratti di linea ferroviaria allo scoperto.

È stata effettuata, in particolare, una verifica della destinazione d'uso dei ricettori. I risultati di tale verifica sono stati riportati sulla planimetria di localizzazione dei ricettori censiti e nelle schede di censimento dei ricettori.

Nelle planimetrie di censimento su menzionate, in merito ai ricettori censiti sono state evidenziate mediante apposita campitura colorata le informazioni di seguito descritte:

##### Tipologia dei ricettori

- Residenziale;
- Industriale, artigianale;
- Commerciale, servizi;
- Ruederi, dismessi, box e depositi;
- Pertinenza FS;
- Espropri/demolizioni.

	<b>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>LOTTO 1 BATTIPAGLIA - PRAIA</b> <b>LOTTO 1B ROMAGNANO - BUONABITACOLO</b> <b>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</b>					
	<b>Relazione Generale</b>	COMMESSA RC2A	LOTTO B1 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. C

### Altezza dei ricettori

- Indicato come numero di piani fuori terra.

L'attività di verifica è stata quindi completata con la redazione di schede di dettaglio in cui sono state riportate per ciascun fabbricato le informazioni riguardanti la localizzazione, lo stato, la consistenza e la relativa documentazione fotografica.

Di seguito viene fornita una descrizione delle informazioni contenute nelle schede:

#### A) *Dati generali*

Codice ricettore individuato da un numero di quattro cifre XZZZ dove

- X è un numero che indica la posizione del ricettore rispetto al binario
- 1 lato dispari rispetto la progressiva crescente di progetto (fascia ferroviaria A)
  - 2 lato pari rispetto la progressiva crescente di progetto (fascia ferroviaria A)
  - 3 lato dispari rispetto la progressiva crescente di progetto (fascia ferroviaria B)
  - 4 lato pari rispetto la progressiva crescente di progetto (fascia ferroviaria B)
  - 5 lato dispari rispetto la progressiva crescente di progetto (oltre 250 m)
  - 6 lato pari rispetto la progressiva crescente di progetto (oltre 250 m)

ZZZ è il numero progressivo del ricettore anomalia

#### B) *Dati localizzativi*

- Comune
- Progressiva ferroviaria
- Distanza dalla linea ferroviaria in progetto valutata rispetto all'asse di tracciamento
- Tipologia linea

#### C) *Dati caratteristici dell'edificio esaminato*

- Numero dei piani
- Orientamento rispetto al binario
- Destinazione d'uso del ricettore

#### D) *Caratterizzazione degli infissi*

- Numero infissi fronte parallelo e/o obliqui

#### E) *Altre sorgenti di rumore*

#### F) *Note*

#### 4.2 Valutazione delle vibrazioni ai ricettori

La determinazione della curva di propagazione dei vettori di accelerazione delle vibrazioni relativa al vettore immissione ( $V_{imm}$ ), vettore residuo ( $V_{res}$ ) e vettore sorgente ( $V_{sorg}$ ) valutati per lo stato di esercizio della linea ferroviaria in progetto permette di definire la distanza oltre la quale sono rispettati i limiti previsti dalla UNI 9614:2017 per la destinazione d'uso abitativa, riferita al periodo diurno e al periodo notturno. Nelle tabelle seguenti si riportano tali distanze riferite alla destinazione d'uso abitativa, risultando la più rappresentativa e cautelativa dei ricettori censiti, definiti nell'ambito di studio.

Di seguito le distanze stimante per la linea allo stato di progetto in riferimento ai limiti della destinazione d'uso abitativa (limite diurno  $7,2 \text{ mm/s}^2$ ; limite notturno  $3,6 \text{ mm/s}^2$ ). In dettaglio, si identificano le seguenti distanze dalla linea ferroviaria oltre le quali si stimano valori inferiori ai limiti normativi.

<b>LOTTO 1B</b>		
<b>Tratto ROMAGNANO - BIVIO PRAJA</b>		
<b>Tratti linea in progetto</b>	<b>Distanza limite per il periodo diurno</b>	<b>Distanza limite per il periodo notturno</b>
tratti al coperto, galleria	18 m	22 m
tratti allo scoperto, in viadotto	17 m	20 m
tratti allo scoperto, in rilevato e/o trincea	20 m	20 m

**Tab. 4.1 – Distanze oltre le quali è rispettato il limite delle vibrazioni per edifici a destinazione abitazione per tipologia di tratta**

Nella tabella seguente si riporta la sintesi della valutazione puntuale ai ricettori, eseguita nella valutazione della funzione di trasferimento relativa ad ogni sezione della tratta ferroviaria. Dall'analisi del confronto coi limiti diurni e notturni per ogni ricettore si riscontra il rispetto dei limiti indicati dalla UNI 9614:2017 in entrambi i periodi.

Eseguendo una analisi dei ricettori entro una distanza di circa 25 m dall'asse ferroviario riferita allo stato di progetto, si identificano i seguenti ricettori per i quali si stima un livello di accelerazione conforme alle soglie di riferimento della norma UNI 9614:2017 per entrambi i periodi di riferimento.

Per le tratte allo scoperto si identificano due ricettori (ad uso abitazione) siti nel Comune di Sala Consilina nei pressi del viadotto. Per la linea al coperto (galleria) si individuano, nella fascia di circa 25 m dal binario, sul Comune di Buccino nove ricettori (7 ad uso abitazione e 2 commerciale e servizi) alle distanze planimetriche, rispetto alla linea ferroviaria del binario (preso come riferimento), da circa 2 m a 27 m e coperture da circa 31 m a 83 m. Nel Comune

di Polla si individuano due ricettori (ad uso abitazione) alle distanze planimetriche, rispetto alla linea ferroviaria del binario, da circa 7 m a 20 m e coperture da circa 43 m a 84 m.

Nella tabella seguente il dettaglio dei ricettori individuati.

ric.	destinazione d'uso	distanza dal binario più prossimo [m]	ricopertura [m]	pk BP	pk BD	Tipologia Opera	Comune	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Diurno mm/s <sup>2</sup>	Vsorg (amplif. interna + incert.) Periodo Notturno mm/s <sup>2</sup>	Limite UNI 9614:2017 Diu / Not mm/s <sup>2</sup>
1008	residenziale	19	34		2+036	galleria	Buccino	0	0	7,2 / 3,6
1009	residenziale	13	33		2+059	galleria	Buccino	0	0	7,2 / 3,6
9002	residenziale	8	75	2+250		galleria	Buccino	0	0	7,2 / 3,6
1010	residenziale	2	64		2+788	galleria	Buccino	0	0	7,2 / 3,6
9004	residenziale	23	83	3+620		galleria	Buccino	0	0	7,2 / 3,6
9005	commerciale	7	37	4+627		galleria	Buccino	0	0	14 / 14
9006	commerciale	22	37	4+634		galleria	Buccino	0	0	14 / 14
9007	residenziale	27	31	4+677		galleria	Buccino	0	0	7,2 / 3,6
9009	residenziale	2	78	7+035		galleria	Buccino	0	0	7,2 / 3,6
9011	residenziale	20	84	21+050		galleria	Polla	0	0	7,2 / 3,6
9013	residenziale	7	43	21+284		galleria	Polla	0	0	7,2 / 3,6
2104	residenziale	26	---	28+930		viadotto	Sala Consilina	0	0	7,2 / 3,6
2109	residenziale	26	---	29+049		viadotto	Sala Consilina	0	0	7,2 / 3,6

**Tab. 4.2 – Distanza dei ricettori entro una distanza di circa 25 m dal binario dispari e dal binario pari**

In sintesi, per lo stato di progetto, dall'analisi dei risultati si riscontra per tutti i ricettori valori conformi, per entrambi i periodi di riferimento, ai limiti fissati dalla UNI 9614:2017.

Considerando, inoltre, che il modello eseguito risulta cautelativo, in quanto si basa su indagini della linea attualmente attiva e nel quale non si è considerato che la futura linea ferroviaria avrà un nuovo armamento, la valutazione previsionale è eseguita con la velocità massima prevista dal modello di esercizio di progetto, oltre alla valutazione dell'amplificazione dell'edificio e dell'incertezza modellistica, si valuta che tutti i ricettore possano per nulla risentire del fenomeno di "annoyance" generato dalla linea ferroviaria. Per il resto dell'opera, i ricettori rimanenti risultano a distanze maggiori dei ricettori esaminati; pertanto, anche per questi si stima il rispetto dei limiti della UNI 9614:2017.



	<b>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>LOTTO 1 BATTIPAGLIA - PRAIA</b> <b>LOTTO 1B ROMAGNANO - BUONABITACOLO</b> <b>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</b>					
	<b>Relazione Generale</b>	COMMESSA RC2A	LOTTO B1 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. C

### 4.3 Tecniche di mitigazione delle vibrazioni

Per la riduzione delle vibrazioni è necessario premettere che uno dei sistemi di mitigazione più efficienti è la manutenzione dei veicoli ferroviari e dei binari. Le vibrazioni possono, infatti, avere origine da corrugazioni delle ruote o delle rotaie, le quali possono indurre incrementi notevoli sulla vibrazione emessa.

Gli interventi di mitigazione delle vibrazioni possono essere suddivisi in due tipologie:

- Interventi di tipo passivo;
- Interventi di tipo attivo.

Gli interventi di **tipo passivo** consistono nella riduzione della propagazione delle vibrazioni introducendo degli ostacoli nel mezzo di propagazione delle stesse nel percorso tra la sorgente ed il ricettore. Interventi di tipo passivo possono essere trincee profonde o diaframmi realizzati nel terreno parallelamente alla linea ferroviaria, i quali interrompono la propagazione delle onde. I diaframmi possono essere realizzati verticalmente con spostamento del suolo (p.es. infissione setto prefabbricato), con mescolamento di suolo in situ (p.es. jet-grouting) o con asportazione del terreno (p.es. trincee profonde).

Gli interventi di **tipo attivo** hanno lo scopo di ridurre l'emissione della vibrazione sulla sorgente e possono prevedere interventi o sull'armamento oppure sul corpo ferroviario. Gli interventi di tipo attivo possono essere relativi a platee di tipo flottante, con materassino elastomerico, oppure utilizzando manufatti flottanti in calcestruzzo armato, con sospensioni in gomma come piastre elastomeriche.

Le platee di tipo flottanti si realizza inserendo tra il piano di posa del ballast ed il ballast un materassino antivibrante elastomerico (impiego sotto-ballast) oppure usando manufatti flottanti con sospensioni in materassini di gomma (impiego sotto-piastra). La soluzione prevede quindi che sia individuato il tipo di materassino antivibrante che si intende impiegare nell'opera e la sua integrazione nell'armamento. Da letteratura i materassini (elastomerici) hanno una densità da 100 a 600 kg/m<sup>3</sup>, spessori da 20 a 50 mm e prestazioni di riduzione delle vibrazioni di almeno 10 dB. Per la scelta del materiale va tenuto in considerazione che lo spettro della vibrazione per i transiti ferroviari è compreso fra 30 e 80 Hz. In applicazione in tratti allo scoperto la scelta dovrà prevedere materiali adatti per applicazione all'esterno.

	<b>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA</b> <b>LOTTO 1 BATTIPAGLIA - PRAIA</b> <b>LOTTO 1B ROMAGNANO - BUONABITACOLO</b> <b>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</b>					
	<b>Relazione Generale</b>	COMMESSA RC2A	LOTTO B1 R 22	CODIFICA RG	DOCUMENTO IM0004 002	REV. C

## 5 CONCLUSIONI

Il presente studio specialistico ha avuto come oggetto la valutazione previsionale di impatto vibrazionale per l'esercizio della futura linea relativa alla **Linea Ferroviaria Salerno – Reggio Calabria: Nuova linea AV Salerno – Reggio Calabria – Lotto 1B, della tratta Battipaglia-Praia, denominato “Romagnano – Buonabitacolo”**.

Per la valutazione è stata effettuata una caratterizzazione ante operam dove è stato analizzato il territorio allo stato attuale (situazione ante operam) identificando gli ingombri e le volumetrie di tutti i fabbricati presenti con particolare riguardo alla destinazione d'uso dei ricettori potenzialmente impattati e ricadenti nella fascia di pertinenza acustica ferroviaria.

Successivamente, con l'ausilio del modello di simulazione e quindi della funziona di trasferimento delle vibrazioni indotte dall'esercizio ferroviario, opportunamente verificata e tarata, si è proceduto alla valutazione del livello e dei limiti di vibrazione ai ricettori in esame per la situazione in studio, relativa allo stato di progetto, in base alla UNI 9614:2017 “*Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo*”.

Nello stato di progetto sono stati analizzati nel dettaglio sia il futuro tracciato, sia l'MdE previsto in termini di numero e tipologia di convogli che di velocità massime di esercizio, oltre che in termini di vibrazioni generate dai transiti ferroviari.

In questa configurazione; dall'esame dei livelli ai ricettori si evince il rispetto dei limiti previsti dalla UNI 9614:2017 in relazione alla destinazione d'uso dei ricettori e quindi si valuta che tutti i ricettori, possano non risentire del fenomeno di “*annoyance*” generato dalla linea ferroviaria.

Si evidenzia altresì che il modello eseguito ha mantenuto un approccio cautelativo, in quanto si basa su indagini della linea attualmente attiva e nel quale non si è considerato che la futura linea ferroviaria avrà un nuovo armamento, la valutazione previsionale è eseguita con la velocità massima prevista dal modello di esercizio di progetto, oltre alla valutazione dell'amplificazione dell'edificio e dell'incertezza modellistica applicata

In conclusione, lo studio dell'impatto delle vibrazioni dell'infrastruttura ferroviaria allo stato di progetto nella fase di esercizio, all'interno del contesto in esame, ha condotto a formulare delle considerazioni positive sull'inserimento dell'opera. Per i ricettori presenti nell'ambito di studio, infatti, si stima una esposizione ad un livello di accelerazione conforme alle soglie di riferimento della norma UNI 9614:2017.