

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O. ARCHITETTURA, AMBIENTE E TERRITORIO

PROGETTO DEFINITIVO

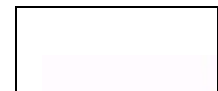
NODO DI NOVARA

1^ FASE PRG DI NOVARA BOSCHETTO

STUDIO VIBRAZIONALE

Relazione Generale

SCALA:



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

N M 0 Y 0 0 D 2 2 R G I M 0 0 0 4 0 0 2 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
A	Emissione Esecutiva	M. Mulè	Febbraio 2021	R. Azzarito	Febbraio 2021	F. Perrone	Febbraio 2021	D. Ludovici	Febbraio 2021



File: NM0Y00D22RGIM0004002A.doc

n. Elab.: X

INDICE


1. PREMESSA	2
2. RIFERIMENTI LEGISLATIVI	3
2.1 ISO 2631 "VALUTAZIONE SULL'ESPOSIZIONE DEL CORPO UMANO ALLE VIBRAZIONI"	3
2.2 UNI 9614 "MISURA DELLE VIBRAZIONI NEGLI EDIFICI E CRITERI DI VALUTAZIONE DEL DISTURBO"	4
2.3 UNI 9916 "CRITERI DI MISURA E VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DELLE VIBRAZIONI SUGLI EDIFICI",	6
3. VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI IN FASE DI ESERCIZIO DELLA LINEA FERROVIARIA	11
3.1 MODELLO PREVISIONALE.....	11
3.2 CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE	12
3.3 PROPAGAZIONE DELLE ONDE VIBRAZIONALI E CONFRONTO CON I DATI SPERIMENTALI	36
4. CONCLUSIONI	41

1. PREMESSA

Il presente documento contiene i risultati dello studio relativo all'impatto vibrazionale prodotto dai transiti ferroviari lungo la linea Novara - Boschetto binario unico in direzione Caltignaga e nelle vicinanze della stazione di Vignale.

Il lavoro tiene conto delle indicazioni delle norme tecniche, emanate in sede nazionale ed internazionale, e si basa anche sui risultati della campagna di rilievi vibro-metrici appositamente eseguita nell'ambito della progettazione in oggetto e a cui si fa riferimento per i dettagli del caso. L'analisi dei livelli vibro-metrici viene 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 anche del modello di esercizio all'orizzonte temporale di progetto, è confrontato con i limiti indicati dalle norme tecniche per il periodo diurno (07-22) e il periodo notturno (22-07), così come previsto dal "Manuale di Progettazione delle Opere Civili di RFI (cod. RFIDTCSIAGMAIFS001A – dic. 2016)".

	PROGETTO DEFINITIVO NODO DI NOVARA 1^ FASE PRG DI NOVARA BOSCHETTO					
	Studio Vibrazionale Relazione Generale	COMMESSA NMOY	LOTTO 00	CODIFICA D 22 RG	DOCUMENTO IM 00 04 002	REV. A

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.

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

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

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 integrale della norma) fornisce informazioni sui criteri di valutazione della risposta soggettiva alle vibrazioni; in pratica sono riportati i fattori di moltiplicazione da applicare alle curve base delle accelerazioni e delle velocità al variare del periodo di riferimento (giorno e notte), del tipo di vibrazione (vibrazioni continue o intermittenti, vibrazioni transitorie) e del tipo di insediamento (ospedali, laboratori di precisione, residenze, uffici, industrie). Le vibrazioni devono essere misurate nel punto di ingresso nel corpo umano e deve essere rilevato il valore di accelerazione r.m.s. perpendicolarmente alla superficie vibrante. Nel caso di edifici residenziali in cui non è facilmente definibile un asse specifico di vibrazione, in quanto lo stesso edificio può essere usato da persone in piedi o coricate in diverse ore del giorno, la norma presenta una curva limite che tiene conto delle condizioni più sfavorevoli combinate in tre assi.

2.2 UNI 9614 "MISURA DELLE VIBRAZIONI NEGLI EDIFICI E CRITERI DI VALUTAZIONE DEL DISTURBO"

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


Dato che gli effetti prodotti dalle vibrazioni sono differenti a seconda della frequenza delle accelerazioni, vanno impiegati dei filtri che ponderano le accelerazioni a seconda del loro effetto sul soggetto esposto. Tali filtri rendono tutte le componenti dello spettro equivalenti in termini di percezione e quindi di disturbo. I simboli dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza e del corrispondente livello sono rispettivamente, a_w e L_w . Quest'ultimo, espresso in dB, è definito come $L_w = 20 \log_{10} (a_w / 10^{-6} \text{ ms}^{-2})$. Il filtro per le accelerazioni che si trasmettono secondo l'asse z prevede una attenuazione di 3 dB per ottava tra 4 e 1 Hz, una attenuazione nulla

tra 4 e 8 Hz ed una attenuazione di 6 dB per ottava tra 8 e 80 Hz. Il filtro per le accelerazioni che si trasmettono secondo gli assi x e y prevede un'attenuazione nulla tra 1 e 2 Hz e una attenuazione di 6 dB per ottava tra 2 e 80 Hz. La banda di frequenza 1-80 Hz deve essere limitata da un filtro passabanda con una pendenza asintotica di 12 dB per ottava. Nel caso la postura del soggetto esposto non sia nota o vari nel tempo, va impiegato il filtro definito nel prospetto I della norma, ottenuto considerando per ogni banda il valore minimo tra i due filtri suddetti. In alternativa, i rilievi su ogni asse vanno effettuati utilizzando in successione i filtri sopraindicati; ai fini della valutazione del disturbo verrà considerato il livello dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza più elevato.

Come riportato dalla norma, la soglia di percezione delle vibrazioni si pone a 74 dB per l'asse Z e a 71 dB per gli assi X e Y. I valori limite per la valutazione del disturbo da vibrazioni sono riportati nel prospetto III della norma e risultano essere per gli assi X,Y e Z in riferimento alla pesatura per postura non nota i seguenti:

- Aree critiche: 71 dB
- Abitazioni (notte): 74 dB
- Abitazioni (giorno): 77 dB
- Uffici: 83 dB
- Fabbriche: 89 dB

Nell'Appendice della norma UNI 9614, che non costituisce parte integrante della norma, si indica che la valutazione del disturbo associato alle vibrazioni di livello costante deve essere svolta confrontando i valori delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza, o i corrispondenti livelli più elevati riscontrati sui tre assi, con una serie di valori limite riportati nei prospetti II e III. Quando i valori o i livelli delle vibrazioni in esame superano i limiti, le vibrazioni possono essere considerate oggettivamente disturbanti per il soggetto esposto. Nel caso di vibrazioni di tipo impulsivo è necessario misurare il livello di picco dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza; tale livello deve essere successivamente diminuito di 3 dB al fine di stimare il corrispondente livello efficace. I limiti possono essere adottati se il numero di eventi impulsivi

	PROGETTO DEFINITIVO NODO DI NOVARA 1^ FASE PRG DI NOVARA BOSCHETTO					
Studio Vibrazionale Relazione Generale	COMMESSA NMOY	LOTTO 00	CODIFICA D 22 RG	DOCUMENTO IM 00 04 002	REV. A	FOGLIO 6 di 42

giornalieri non è superiore a 3. Nel caso si manifestino più di 3 eventi impulsivi giornalieri i limiti fissati per le abitazioni, gli uffici e le fabbriche vanno diminuiti in base al numero di eventi e alla loro durata, moltiplicandoli per un fattore correttivo F. Nessuna riduzione può essere applicata per le aree critiche. Nel caso di impulsi di durata inferiore a 1 s si deve porre $F = 1.7 \cdot N^{0.5}$. Per impulsi di durata maggiore si deve porre $F = 1.7 \cdot N^{-0.5} \cdot t^{-k}$, con $k = 1.22$ per pavimenti in calcestruzzo e $k = 0.32$ per pavimenti in legno. Qualora i limiti così calcolati risultassero inferiori ai limiti previsti per le vibrazioni di livello stazionario, dovranno essere adottati questi ultimi valori.

2.3 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.

Gli edifici sono classificati secondo tre tipologie:

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

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

- *Danno di architettonico (o di soglia)*: effetto residuo delle vibrazioni che determina alterazione estetica o funzionale dell'edificio senza comprometterne la stabilità strutturale o la sicurezza degli occupanti. Il danno architettonico si presenta in molti casi con la formazione o l'accrescimento di fessure filiformi sulle superfici dei muri a secco o sulle superfici intonacate o nei giunti di malta delle costruzioni in mattoni

- *Danno maggiore:* Effetto che si presenta con la formazione di fessure più marcate, distacco e caduta di gesso o pezzi di intonaco fino al danneggiamento di elementi strutturali (per esempio fessure nei pilastri e nelle travature, apertura di giunti).

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

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

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

prospetto D.1 Valori di riferimento per la velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni di breve durata sulle costruzioni

Classe	Tipo di edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s				
		Fondazioni			Piano alto	Solai Componente Verticale
		Da 1 Hz a 10 Hz	Da 10 Hz a 50 Hz	Da 50 Hz a 100 Hz ¹⁾		
1	Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili	20	Varia linearmente da 20 ($f=10$ Hz) a 40 ($f=50$ Hz)	Varia linearmente da 40 ($f=50$ Hz) a 50 ($f=100$ Hz)	Per tutte le frequenze	Per tutte le frequenze
2	Edifici residenziali e costruzioni simili	5	Varia linearmente da 5 ($f=10$ Hz) a 15 ($f=50$ Hz)	Varia linearmente da 15 ($f=50$ Hz) a 20 ($f=100$ Hz)	15	20
3	Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)	3	Varia linearmente da 3 ($f=10$ Hz) a 8 ($f=50$ Hz)	Varia linearmente da 8 ($f=50$ Hz) a 10 ($f=100$ Hz)	8	3/4

¹⁾ Per frequenze oltre 100 Hz possono essere usati i valori di riferimento per 100 Hz.

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

prospetto D.2 Valori di riferimento per le componenti orizzontali della velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni durature sulle costruzioni

Classe	Tipo di edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s (per tutte le frequenze)
1	Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili	10
2	Edifici residenziali e costruzioni simili	5
3	Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)	2,5

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 $20 \div 100$ mm/s oppure per vibrazioni continue associate a velocità di $3 \div 10$ mm/s.
- *Danno maggiore*: danneggiamento di elementi strutturali; fessure nei pilastri; aperture di giunti; serie di fessure nei blocchi di muratura. Possono verificarsi per vibrazioni di piccola durata con frequenze superiori a 4 Hz e velocità vibrazionale compresa tra $20 \div 200$ mm/s oppure per vibrazioni continue associate a velocità di $5 \div 20$ mm/s.

	PROGETTO DEFINITIVO NODO DI NOVARA 1^ FASE PRG DI NOVARA BOSCHETTO					
Studio Vibrazionale Relazione Generale	COMMESSA NMOY	LOTTO 00	CODIFICA D 22 RG	DOCUMENTO IM 00 04 002	REV. A	FOGLIO 11 di 42

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. Tale situazioni si verificano tuttavia in corrispondenza di livelli di vibrazione notevoli, superiori di almeno un ordine di grandezza rispetto ai livelli tipici dell'annoyance.

Nel caso specifico il territorio interessato dal progetto è di tipo 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 mediamente di 1-2 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 sciolti e presentano un comportamento abbastanza omogeneo in relazione al trasferimento di onde vibratorie.

Per quanto riguarda le sorgenti vibrazionali attualmente presenti si evidenziano una serie di infrastrutture stradali di vario tipo, sia a singola, sia a doppia carreggiata, che in alcuni casi corrono parallelamente alla tratta ferroviaria e in altri casi ne attraversano il tracciato.

3.1 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 specifiche del territorio in esame, sono stati utilizzati i dati desunti dai rilievi vibrazionali eseguite per valutare

la catena di trasmissione delle vibrazioni. Il livello di vibrazione in corrispondenza di un punto ad una distanza "x" dalla sede ferroviaria è pari al livello alla distanza di riferimento "x₀", diminuito della somma delle attenuazioni che si verificano nel terreno tra x₀ e x:

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

Il livello di base L(x₀) è generalmente ricavato da misure sperimentali svolte in adiacenza alle linee ferroviarie a distanze comprese tra 5 m e 25 m.

3.2 CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE

Per quanto concerne la sorgente costituita dal complesso treno–armamento è indispensabile 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

- rigidzze
- smorzamenti
- masse
- coefficienti di difettosità

I dati utilizzati per la caratterizzazione della sorgente si riferiscono ad una campagna di rilevamenti eseguita lungo l'attuale linea in esercizio. La strumentazione è stata posizionata in corrispondenza di una sezione di corpo ferroviario in rilevato e lungo la via di propagazione del fenomeno vibratorio per complessivi tre punti di misura in una unica sezione. I rilievi hanno interessato tutte le tipologie di treni in transito, riportate nelle sottostanti tabelle.

Vignale

Numero di treni rilevato durante le misure VIB_01		
Tipologia treni	Periodo Diurno	Periodo Notturno
MRI	1	1
MRS	1	2
Regionali	26	1
TC	1	1
TEC	15	20
INV	-	1
LIS	-	1

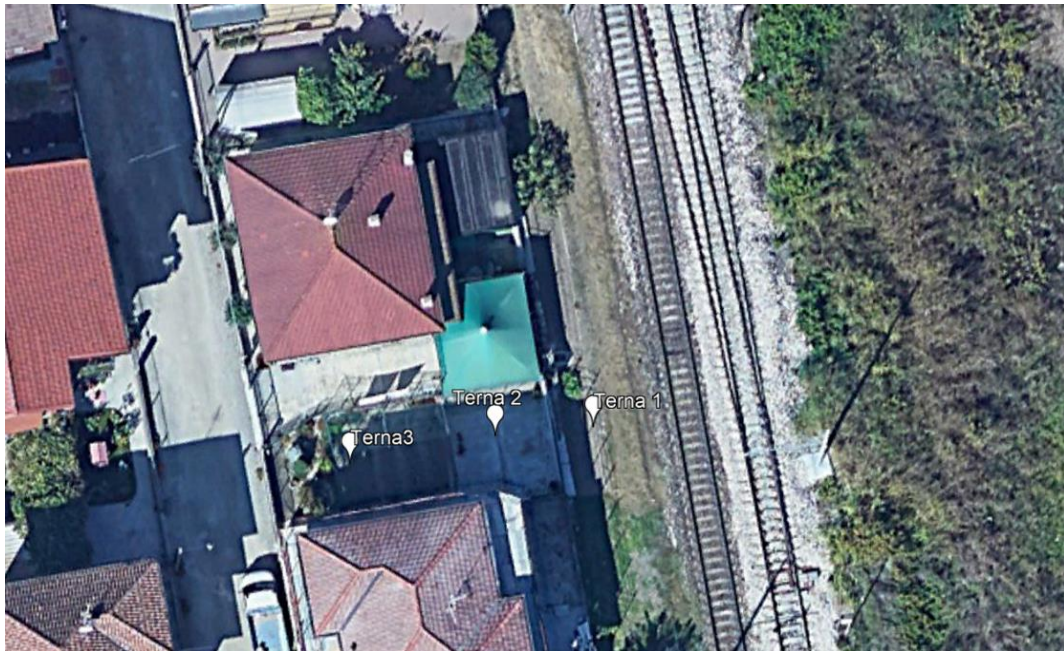
Durante la misura di durata giornaliera sono transitati 70 convogli ferroviari, dei quali 44 durante il periodo diurno e 26 durante quello notturno.

Le tre terne accelerometriche sono state così posizionate:

- Terna 1: in un terreno agricolo, a 5,0 metri dall'asse binario;
- Terna 2: su una pavimentazione in area esterna di pertinenza di una casa privata a distanza di 10m dall'asse binario;
- Terna 3: su una pavimentazione in area esterna di pertinenza di una casa privata a distanza di 20m dall'asse binario;



Area di indagine



Postazioni di misura (Asse x: parallelo alla linea; Asse Y: ortogonale alla linea; Asse Z verticale)

Si riportano nella seguente tabella di sintesi i valori in base alla nuova **UNI 9614:2017** dei 15 transiti ferroviari più impattanti sulle 24 ore di misura, rimandando al report allegato per il dettaglio dei singoli transiti. I transiti sono avvenuti sia nel periodo diurno che in quello notturno.

UNI 9614:2017 V.Sor Treni - Terna 1 a 5 m							
PERIODO DIURNO							
Evento n.	Date e ora	$a_{w,max,j}$ (dB)	Tipo treno	Media aritmetica $a_{w,max,j}$ (mm/s ²)	$\square(\square a)^2$	\square	$a_{w,95}$ (mm/s ²)
1	13/01/2021 16:38	98,6	TEC	59,29	2755,2	14,0	84,5
2	13/01/2021 15:57	98	TEC				$V_{imm,D}$
3	13/01/2021 19:19	97,4	REG				
4	13/01/2021 18:45	97	TEC				$V_{sor,D}$ (mm/s ²)

5	13/01/2021 15:18	96,3	REG				84,5
6	13/01/2021 15:42	96	TEC				
7	13/01/2021 20:57	96	TEC				
8	13/01/2021 14:19	95,8	REG				Limite 7,2 (mm/s ²)
9	13/01/2021 19:27	95	REG				
10	13/01/2021 14:28	93,6	REG				
11	13/01/2021 17:40	93,4	REG				
12	13/01/2021 17:28	93,3	REG				
13	13/01/2021 21:29	93,1	TEC				
14	14/01/2021 06:50	93	REG				
15	13/01/2021 15:26	92	REG				

UNI 9614:2017 V.Sor Treni - Terna 1 a 5 m

PERIODO NOTTURNO

Evento n.	Date e ora	$a_{w,max,j}$ (dB)	Tipo treno	Media aritmetica $a_{w,max,j}$ (mm/s ²)	$\square(\square a)^2$	\square	$a_{w,95}$ (mm/s ²)
1	13/01/2021 22:48	95,9	TEC	47,41	1279,1	9,6	64,6
2	13/01/2021 22:01	95,7	TEC				$V_{imm,N}$
3	14/01/2021 04:31	95	TEC				
4	14/01/2021 01:49	94,9	TEC				$V_{sor,D}$ (mm/s ²)
5	14/01/2021 03:53	94,7	TEC				64,6
6	14/01/2021 01:26	94,2	MRS				
7	13/01/2021 23:42	94,1	TEC				
8	14/01/2021 02:40	93,5	TEC				Limite 3,6 (mm/s ²)
9	14/01/2021 00:47	93	TEC				

10	14/01/2021 05:00	93	TC				
11	14/01/2021 01:02	92,7	MRS				
12	14/01/2021 02:58	91,1	TEC				
13	14/01/2021 05:50	91	REG				
14	13/01/2021 23:12	90,8	TEC				
15	14/01/2021 02:10	90,6	TEC				

UNI 9614:2017 V.Sor Treni - Terna 2 a 10 m

PERIODO DIURNO

Evento n.	Date e ora	$a_{w,max,j}$ (dB)	Tipo treno	Media aritmetica $a_{w,max,j}$ (mm/s ²)	$\square(\square a)^2$	\square	$a_{w,95}$ (mm/s ²)
1	13/01/2021 16:38	85,9	TEC	12,70	272,6	4,4	20,6
2	13/01/2021 15:57	85,3	TEC				$V_{imm,D}$
3	13/01/2021 19:19	82,8	REG				
4	13/01/2021 18:45	84	TEC				$V_{sor,D}$ (mm/s ²)
5	13/01/2021 15:18	80,9	REG				20,6
6	13/01/2021 15:42	82,3	TEC				
7	13/01/2021 20:57	85,2	TEC				
8	13/01/2021 14:19	82,2	REG				Limite 7,2 (mm/s ²)
9	13/01/2021	80,9	REG				

	19:27						
10	13/01/2021 14:28	79	REG				
11	13/01/2021 17:40	71,9	REG				
12	13/01/2021 17:28	79,2	REG				
13	13/01/2021 21:29	81,2	TEC				
14	14/01/2021 06:50	83,9	REG				
15	13/01/2021 15:26	77,2	REG				

UNI 9614:2017 V.Sor Treni - Terna 2 a 10 m

PERIODO NOTTURNO

Evento n.	Date e ora	$a_{w,max,j}$ (dB)	Tipo treno	Media aritmetica $a_{w,max,j}$ (mm/s ²)	$\square(\square a)^2$	\square	$a_{w,95}$ (mm/s ²)
1	13/01/2021 22:48	84,4	TEC	15,00	338,0	4,9	23,8
2	13/01/2021 22:01	85,8	TEC				$V_{imm,N}$
3	14/01/2021 04:31	86,7	TEC				
4	14/01/2021 01:49	82,5	TEC				$V_{sor,D}$ (mm/s ²)
5	14/01/2021 03:53	88,3	TEC				23,8
6	14/01/2021 01:26	83,8	MRS				

7	13/01/2021 23:42	80,8	TEC				
8	14/01/2021 02:40	85,1	TEC				Limite 3,6 (mm/s ²)
9	14/01/2021 00:47	82,5	TEC				
10	14/01/2021 05:00	84,5	TC				
11	14/01/2021 01:02	81,5	MRS				
12	14/01/2021 02:58	82,9	TEC				
13	14/01/2021 05:50	80,7	REG				
14	13/01/2021 23:12	78,4	TEC				
15	14/01/2021 02:10	78,5	TEC				

UNI 9614:2017 V.Sor Treni - Terna 3 a 20 m

PERIODO DIURNO

Evento n.	Date e ora	a _{w,max,j} (dB)	Tipo treno	Media aritmetica a _{w,max,j} (mm/s ²)	$\square(\square a)^2$	\square	a _{w,95} (mm/s ²)
1	13/01/2021 16:38	77,8	TEC	3,73	46,6	1,8	7,0
2	13/01/2021 15:57	62,8	TEC				V _{imm,D}
3	13/01/2021 19:19	72,2	REG				
4	13/01/2021	74,4	TEC				V _{vor,D} (mm/s ²)

	18:45						
5	13/01/2021 15:18	61,7	REG				7,0
6	13/01/2021 15:42	73	TEC				
7	13/01/2021 20:57	75,7	TEC				
8	13/01/2021 14:19	71,8	REG				Limite 7,2 (mm/s ²)
9	13/01/2021 19:27	71	REG				
10	13/01/2021 14:28	65,5	REG				
11	13/01/2021 17:40	63,9	REG				
12	13/01/2021 17:28	69,9	REG				
13	13/01/2021 21:29	71,5	TEC				
14	14/01/2021 06:50	73,6	REG				
15	13/01/2021 15:26	70	REG				

UNI 9614:2017 V.Sor Treni - Terna 3 a 20 m

PERIODO NOTTURNO

Evento n.	Date e ora	$a_{w,max,j}$ (dB)	Tipo treno	Media aritmetica $a_{w,max,j}$ (mm/s ²)	$\square(\square a)^2$	\square	$a_{w,95}$ (mm/s ²)
1	13/01/2021 22:48	75,4	TEC	4,86	38,1	1,6	7,8

2	13/01/2021 22:01	75,7	TEC				$V_{imm,N}$
3	14/01/2021 04:31	77,7	TEC				
4	14/01/2021 01:49	73,4	TEC				$V_{sor,D} (mm/s^2)$
5	14/01/2021 03:53	78	TEC				7,8
6	14/01/2021 01:26	73,5	MRS				
7	13/01/2021 23:42	71,2	TEC				
8	14/01/2021 02:40	76	TEC				Limite 3,6 (mm/s ²)
9	14/01/2021 00:47	71,9	TEC				
10	14/01/2021 05:00	74,5	TC				
11	14/01/2021 01:02	71	MRS				
12	14/01/2021 02:58	72,8	TEC				
13	14/01/2021 05:50	70	REG				
14	13/01/2021 23:12	69,7	TEC				
15	14/01/2021 02:10	68,2	TEC				

Utilizzando la metodica definita dalla norma UNI 9614:2017, si è proceduto ad individuare 15 eventi distinti più rappresentative della misura, e con essi a calcolare l'accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni immesse dai passaggi ferroviari ($V_{imm,D}$) e successivamente si è calcolato il valore della Sorgente ($V_{sor,D}$).

Il valore immissione è uguale al valore sorgente perché il valore residuo (V_{res}) è ininfluenza.

Per la 9614:1990 si ha invece:

DIURNO - VIB_02			
TERNA A 5 M	UNI9614:1990 mm/s2 a 5 metri		
	mm/s2		
LIMITE UNI DIURNO mm/s2	X	Y	Z
		7,2	7,2
a_wUNI [mm/s²]	1,32	1,5	1,3
LIMITE UNI DIURNO VEICOLI FERROVIARI mm/s2	X	Y	Z
	21,6	21,6	30,0
a_wmaxUNI [mm/s²]	39,36	44,16	35,08

TERNA A 10 M	UNI9614:1990 mm/s2 a 10 metri		
	mm/s2		
LIMITE UNI DIURNO mm/s2	X	Y	Z
		7,2	7,2
a_wUNI [mm/s²]	0,68	1,2	0,8
LIMITE UNI DIURNO VEICOLI FERROVIARI mm/s2	X	Y	Z
	21,6	21,6	30,0
a_wmaxUNI [mm/s²]	11,58	11,61	11,35

TERNA A 20 M	UNI9614:1990 mm/s2 a 20 metri		
	mm/s2		
LIMITE UNI DIURNO mm/s2	X	Y	Z

	7,2	7,2	7,2
a_w UNI [mm/s ²]	0,38	0,5	0,5
LIMITE UNI DIURNO VEICOLI FERROVIARI mm/s2	X	Y	Z
	21,6	21,6	30,0
a_w maxUNI [mm/s ²]	9,77	9,12	9,44

NOTTURNO - VIB_02

TERNA A 5 M	UNI9614:1990 mm/s2 a 5 metri		
	mm/s2		
LIMITE UNI NOTTURNO mm/s2	X	Y	Z
	5,0	5,0	5,0
a_w UNI [mm/s ²]	2,09	1,8	1,7
LIMITE UNI NOTTURNO VEICOLI FERROVIARI mm/s2	X	Y	Z
	21,6	21,6	30,0
a_w maxUNI [mm/s ²]	38,02	31,26	35,08

TERNA A 10 M	UNI9614:1990 mm/s2 a 10 metri		
	mm/s2		
LIMITE UNI NOTTURNO mm/s2	X	Y	Z
	5,0	5,0	5,0
a_w UNI [mm/s ²]	0,24	0,3	0,6
LIMITE UNI NOTTURNO VEICOLI FERROVIARI mm/s2	X	Y	Z
	21,6	21,6	30,0

a_wmaxUNI [mm/s²]	4,73	8,32	20,65
---	------	------	-------

TERNA A 20 M	UNI9614:1990 mm/s ² a 20 metri		
	mm/s ²		
LIMITE UNI NOTTURNO mm/s ²	X	Y	Z
	5,0	5,0	5,0
a_wUNI [mm/s²]	0,22	0,2	0,2
LIMITE UNI NOTTURNO VEICOLI FERROVIARI mm/s ²	X	Y	Z
	21,6	21,6	30,0
a_wmaxUNI [mm/s²]	2,75	2,54	5,25

Caltignaga

Numero di treni rilevato durante le misure VIB_02		
Tipologia treni	Periodo Diurno	Periodo Notturno
MRI		
MRS	-	1
Regionali	14	1
TC	-	1
TEC	13	10

Durante la misura di durata giornaliera sono transitati 40 convogli ferroviari, dei quali 23 durante il periodo diurno e 17 durante quello notturno.

Le tre terne accelerometriche sono state così posizionate:

- Terna 1: in un terreno agricolo, a 5,0 metri dall'asse binario;
- Terna 2: su una pavimentazione in area esterna di pertinenza di una carrozzeria a distanza di 10m dall'asse binario;
- Terna 3: su una pavimentazione in area esterna di pertinenza di una carrozzeria a distanza di 20m dall'asse binario;



Area di indagine



Postazioni di misura (Asse x: parallelo alla linea; Asse Y: ortogonale alla linea; Asse Z verticale)

Si riportano nella seguente tabella di sintesi i valori in base alla nuova **UNI 9614:2017** dei 15 transiti ferroviari più impattanti sulle 24 ore di misura, rimandando al report allegato per il dettaglio dei singoli transiti. I transiti sono avvenuti sia nel periodo diurno che in quello notturno.

UNI 9614:2017 V.Sor Treni - Terna 1 a 5 m							
PERIODO DIURNO							
Evento n.	Date e ora	$a_{w,max,j}$ (dB)	Tipo treno	Media aritmetica $a_{w,max,j}$ (mm/s ²)	$\square(\square a)^2$	\square	$a_{w,95}$ (mm/s ²)
1	12/01/2021 16:06	96	TEC	46,37	819,7	7,7	60,1
2	12/01/2021 16:46	95,3	TEC				$V_{imm,D}$
3	12/01/2021 13:01	95,1	TEC				
4	12/01/2021 15:04	93,7	TEC				$V_{sor,D}$ (mm/s ²)

5	12/01/2021 15:20	93,5	REG				60,1
6	12/01/2021 20:57	93,4	TEC				
7	12/01/2021 21:59	93	TEC				
8	12/01/2021 14:25	92,9	REG				Limite 7,2 (mm/s ²)
9	12/01/2021 20:02	92,8	REG				
10	12/01/2021 20:25	92,8	REG				
11	12/01/2021 15:52	92,7	REG				
12	12/01/2021 17:41	92,4	REG				
13	12/01/2021 13:51	92,3	REG				
14	13/01/2021 09:08	91,2	TEC				
15	13/01/2021 09:35	91,2	TEC				

V.Sor Treni - Terna 1 a 5 m

PERIODO NOTTURNO

Evento n.	Date e ora	a _{w,max,j} (dB)	Tipo treno	Media aritmetica a _{w,max,j} (mm/s ²)	□ (□a) ²	□	a _{w,95} (mm/s ²)
1	13/01/2021 01:08	96,2	MRS	37,43	4112,5	17,1	68,3
2	13/01/2021 02:04	94,1	TEC				V _{imm,N}
3	12/01/2021 23:07	93,9	TEC				
4	12/01/2021 23:45	93,2	TEC				V _{sor,D} (mm/s ²)
5	12/01/2021 22:56	93	TEC				68,3
6	13/01/2021 04:47	92,9	TEC				
7	13/01/2021 05:26	92,4	TC				
8	13/01/2021 02:37	92	TEC				Limite 3,6 (mm/s ²)
9	13/01/2021 02:45	92	TEC				

10	13/01/2021 00:27	91,8	TEC				
11	13/01/2021 06:49	91,1	REG				
12	13/01/2021 04:07	91	TEC				
13	13/01/2021 04:24	89,7	TEC				
14	13/01/2021 05:51	89,4	REG				
15	13/01/2021 06:30	89,4	TEC				

UNI 9614:2017 V.Sor Treni - Terna 2 a 10 m

PERIODO DIURNO

Evento n.	Date e ora	$a_{w,max,j}$ (dB)	Tipo treno	Media aritmetica $a_{w,max,j}$ (mm/s ²)	$\square(\square a)^2$	\square	$a_{w,95}$ (mm/s ²)
1	12/01/2021 16:06	84,5	TEC	12,74	123,9	3,0	18,1
2	12/01/2021 16:46	84,2	TEC				$V_{imm,D}$
3	12/01/2021 13:01	83,7	TEC				
4	12/01/2021 15:04	81,4	TEC				$V_{sor,D}$ (mm/s ²)
5	12/01/2021 15:20	82,2	REG				18,1
6	12/01/2021 20:57	83,8	TEC				
7	12/01/2021 21:59	83,5	TEC				
8	12/01/2021 14:25	81	REG				Limite 7,2 (mm/s ²)
9	12/01/2021	81,6	REG				

	20:02						
10	12/01/2021 20:25	83,7	REG				
11	12/01/2021 15:52	81,6	REG				
12	12/01/2021 17:41	81,7	REG				
13	12/01/2021 13:51	80,2	REG				
14	13/01/2021 09:08	76,6	TEC				
15	13/01/2021 09:35	78	TEC				

UNI 9614:2017 V.Sor Treni - Terna 2 a 10 m

PERIODO NOTTURNO

Evento n.	Date e ora	$a_{w,max,j}$ (dB)	Tipo treno	Media aritmetica $a_{w,max,j}$ (mm/s ²)	$\square(\square a)^2$	\square	$a_{w,95}$ (mm/s ²)
1	13/01/2021 01:08	83,6	MRS	11,23	282,4	4,5	19,3
2	13/01/2021 02:04	87,8	TEC				$V_{imm,N}$
3	12/01/2021 23:07	82,5	TEC				
4	12/01/2021 23:45	82,1	TEC				$V_{sor,D}$ (mm/s ²)
5	12/01/2021 22:56	81,9	TEC				19,3
6	13/01/2021 04:47	81,4	TEC				

7	13/01/2021 05:26	81	TC				
8	13/01/2021 02:37	79,1	TEC				Limite 3,6 (mm/s ²)
9	13/01/2021 02:45	81,2	TEC				
10	13/01/2021 00:27	76,9	TEC				
11	13/01/2021 06:49	78,9	REG				
12	13/01/2021 04:07	79,4	TEC				
13	13/01/2021 04:24	76,9	TEC				
14	13/01/2021 05:51	77	REG				
15	13/01/2021 06:30	77,5	TEC				

UNI 9614:2017 V.Sor Treni - Terna 3 a 20 m

PERIODO DIURNO

Evento n.	Date e ora	a _{w,max,j} (dB)	Tipo treno	Media aritmetica a _{w,max,j} (mm/s ²)	$\square(\square a)^2$	\square	a _{w,95} (mm/s ²)
1	12/01/2021 16:06	63,2	TEC	3,63	17,2	1,1	5,6
2	12/01/2021 16:46	74,3	TEC				V _{imm,D}
3	12/01/2021 13:01	-	REG				
4	12/01/2021	-	TEC				V _{vor,D} (mm/s ²)

	15:04						
5	12/01/2021 15:20	-	REG				5,6
6	12/01/2021 20:57	75,2	TEC				
7	12/01/2021 21:59	72,3	TEC				
8	12/01/2021 14:25	70,2	REG				Limite 7,2 (mm/s ²)
9	12/01/2021 20:02	71,4	REG				
10	12/01/2021 20:25	74,1	REG				
11	12/01/2021 15:52	67,9	REG				
12	12/01/2021 17:41	69,5	REG				
13	12/01/2021 13:51	69,8	TEC				
14	13/01/2021 09:08	69,6	REG				
15	13/01/2021 09:35	70	REG				

UNI 9614:2017 V.Sor Treni - Terna 3 a 20 m

PERIODO NOTTURNO

Evento n.	Date e ora	a _{w,max,j} (dB)	Tipo treno	Media aritmetica a _{w,max,j} (mm/s ²)	$\square(\square a)^2$	\square	a _{w,95} (mm/s ²)
1	13/01/2021 01:08	72,6	TEC	3,80	14,6	1,0	5,6

2	13/01/2021 02:04	76,6	TEC				$V_{imm,N}$
3	12/01/2021 23:07	72,4	TEC				
4	12/01/2021 23:45	72,3	TEC				$V_{sor,D} (mm/s^2)$
5	12/01/2021 22:56	72,9	TEC				5,6
6	13/01/2021 04:47	72,5	MRS				
7	13/01/2021 05:26	72	TEC				
8	13/01/2021 02:37	71,2	TEC				Limite 3,6 (mm/s ²)
9	13/01/2021 02:45	71	TEC				
10	13/01/2021 00:27	69,3	TC				
11	13/01/2021 06:49	70,4	MRS				
12	13/01/2021 04:07	70,2	TEC				
13	13/01/2021 04:24	70,3	REG				
14	13/01/2021 05:51	67,1	TEC				
15	13/01/2021 06:30	69,4	TEC				

Utilizzando la metodica definita dalla norma UNI 9614:2017, si è proceduto ad individuare 15 eventi distinti più rappresentative della misura, e con essi a calcolare l'accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni immesse dai passaggi ferroviari ($V_{imm,D}$) e successivamente si è calcolato il valore della Sorgente ($V_{sor,D}$).

Il valore immissione è uguale al valore sorgente perché il valore residuo (Vres) è ininfluente

Per la 9614:1990 si ha invece:

DIURNO -VIB_01			
TERNA A 5 M	UNI9614:1990 mm/s2 a 5 metri		
	mm/s2		
LIMITE UNI DIURNO mm/s2	X	Y	Z
		7,2	7,2
a_wUNI [mm/s²]	2,11	2,3	1,6
LIMITE UNI DIURNO VEICOLI FERROVIARI mm/s2	X	Y	Z
	21,6	21,6	30,0
a_wmaxUNI [mm/s²]	35,48	56,89	35,48

TERNA A 10 M	UNI9614:1990 mm/s2 a 10 metri		
	mm/s2		
LIMITE UNI DIURNO mm/s2	X	Y	Z
		7,2	7,2
a_wUNI [mm/s²]	0,24	0,5	0,6
LIMITE UNI DIURNO VEICOLI FERROVIARI mm/s2	X	Y	Z
	21,6	21,6	30,0
a_wmaxUNI [mm/s²]	6,38	13,65	13,65

TERNA A 20 M	UNI9614:1990 mm/s2 a 20 metri		
	mm/s2		
LIMITE UNI DIURNO mm/s2	X	Y	Z


	7,2	7,2	7,2
a_w UNI [mm/s ²]	0,14	0,4	0,3
LIMITE UNI DIURNO VEICOLI FERROVIARI mm/s2	X	Y	Z
	21,6	21,6	30,0
a_w maxUNI [mm/s ²]	4,10	5,19	4,57

NOTTURNO VIB_01			
TERNA A 5 M	UNI9614:1990 mm/s2 a 5 metri		
	mm/s2		
LIMITE UNI NOTTURNO mm/s2	X	Y	Z
	5,0	5,0	5,0
a_w UNI [mm/s ²]	2,66	2,2	2,4
LIMITE UNI NOTTURNO VEICOLI FERROVIARI mm/s2	X	Y	Z
	21,6	21,6	30,0
a_w maxUNI [mm/s ²]	42,66	40,27	32,73

TERNA A 10 M	UNI9614:1990 mm/s2 a 10 metri		
	mm/s2		
LIMITE UNI NOTTURNO mm/s2	X	Y	Z
	5,0	5,0	5,0
a_w UNI [mm/s ²]	0,36	0,7	0,9
LIMITE UNI NOTTURNO VEICOLI FERROVIARI mm/s2	X	Y	Z
	21,6	21,6	30,0

a_wmaxUNI [mm/s²]	8,13	19,28	15,31
---	------	-------	-------

TERNA A 20 M	UNI9614:1990 mm/s² a 20 metri		
	mm/s²		
LIMITE UNI NOTTURNO mm/s²	X	Y	Z
		5,0	5,0
a_wUNI [mm/s²]	0,26	0,2	0,3
LIMITE UNI NOTTURNO VEICOLI FERROVIARI mm/s²	X	Y	Z
	21,6	21,6	30,0
a_wmaxUNI [mm/s²]	3,89	3,89	6,03

	PROGETTO DEFINITIVO NODO DI NOVARA 1^ FASE PRG DI NOVARA BOSCHETTO					
	Studio Vibrazionale Relazione Generale	COMMESSA NMOY	LOTTO 00	CODIFICA D 22 RG	DOCUMENTO IM 00 04 002	REV. A

3.3 PROPAGAZIONE DELLE ONDE VIBRAZIONALI E CONFRONTO CON I DATI SPERIMENTALI

L'attenuazione geometrica

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

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

dove:

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

d_0 : distanza di riferimento

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

La propagazione delle onde nei terreni sciolti

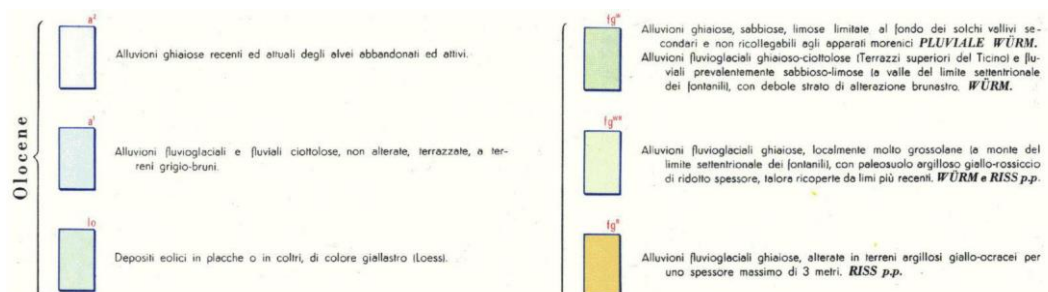
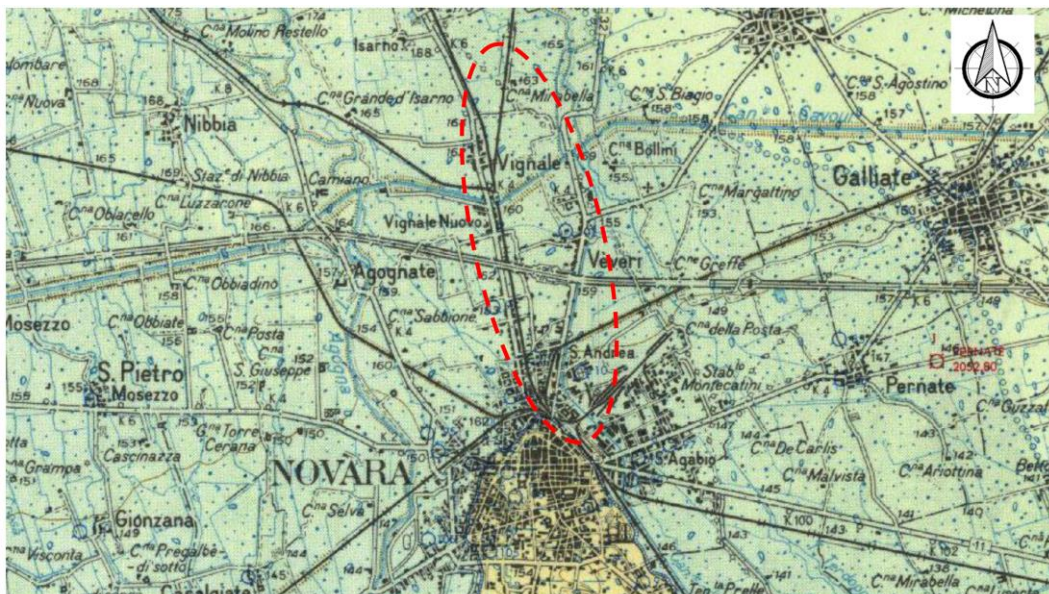
La varietà delle conformazioni morfologiche del terreno comporta le maggiori incertezze di valutazione della propagazione delle vibrazioni. I fattori che possono influire nella determinazione dell'attenuazione nel terreno sono molteplici. I più determinanti sono costituiti dalla natura del mezzo, dal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

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

In generale le rocce lapidee trasmettono tutta la gamma di frequenze, e principalmente le più alte, mentre le rocce sciolte lasciano passare solo le basse frequenze, che comunque corrispondono a quelle di risposta degli edifici. Inoltre mentre le rocce lapidee difficilmente possono subire variazioni di struttura sotto sollecitazioni dinamiche, le rocce sciolte, risultano di gran lunga più sensibili. La loro risposta alla azione di disturbo è diversa a seconda che l'intensità del disturbo

sia lieve o al contrario forte: in altre parole il comportamento dei materiali sciolti è fortemente non lineare. Nel primo caso non si ha una vera variazione della struttura mentre nel secondo caso la vibrazione produce per tutte le rocce sciolte un assestamento e quindi una riduzione di porosità. Ciò avviene in 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 su terreni sciolti di natura prevalentemente alluvionale, con successioni quaternarie ghiaiose, ghiaiose-ciottolose e ghiaiose-sabbiose.



L'analisi delle caratteristiche geolitologiche degli strati superficiali del terreno è finalizzata al riconoscimento dei parametri correlabili alla propagazione delle vibrazioni nel terreno. I valori

tipici di densità, velocità di propagazione e fattore di perdita, noti esclusivamente per alcune classi geologiche e in presenza di un ammasso omogeneo, sono riassunti nella sottostante tabella.

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

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

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

dove:

x : distanza dall'asse della linea ferroviaria

Ω : frequenza [rad*s⁻¹]

η : coeffic. di assorbimento del terreno (fattore di perdita)

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

c : velocità di propagazione dell'onda longitudinale nel terreno

E: modulo elastico

d : densità del terreno

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

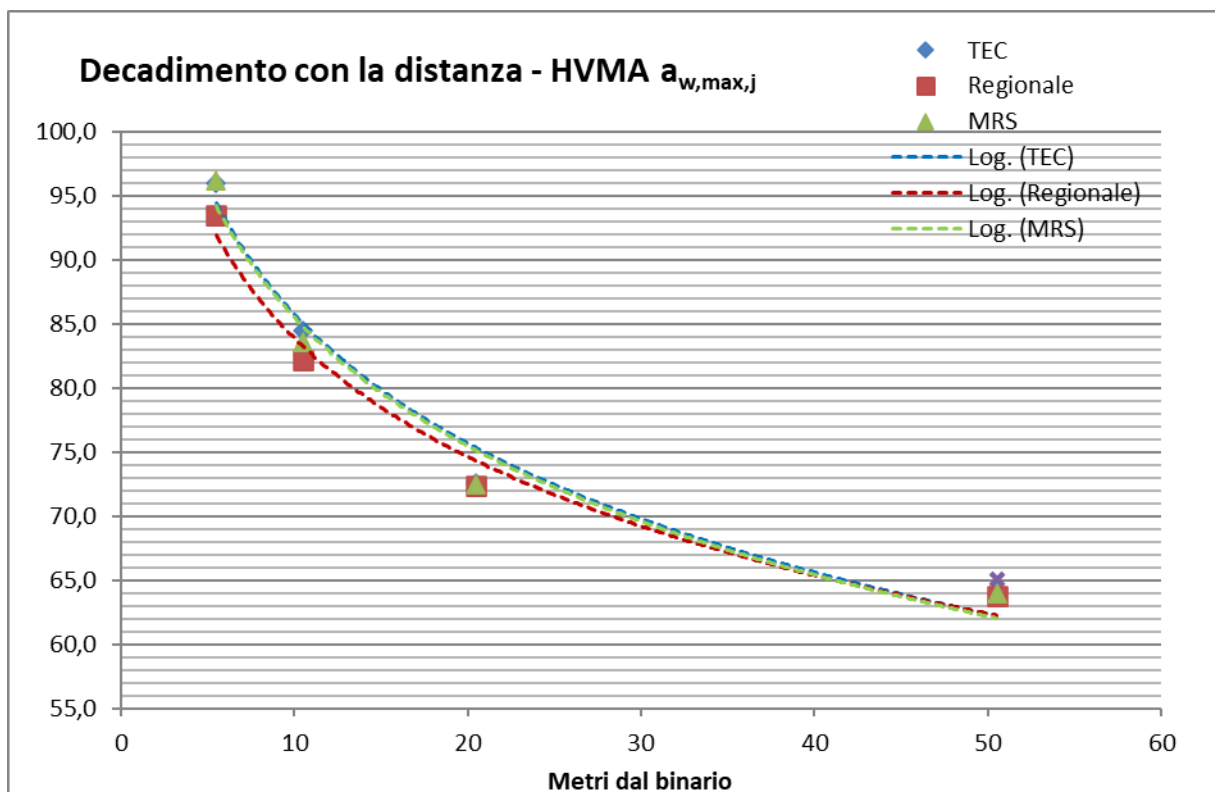
$$A_i = 20 \cdot \log[(1 + d_c \cdot c_c / d_a \cdot c_a) / 2]$$

dove:

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

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 effettuata. 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, come riportato nel seguente grafico, relativo ai livelli misurati in HVMA $a_{w,max,j}$ delle tre terne.



Curva di attenuazione del livello equivalente dell'accelerazione ponderata in frequenza in funzione della distanza dal binario, ricavata dai rilievi sperimentali sull'attuale linea in esercizio relativo ai livelli misurati in HVMA $a_{w,max,j}$ delle tre terne, in corrispondenza della Terna 1 (5,0 metri), della Terna 2 (10 metri) e della Terna 3 (20 metri).

4. CONCLUSIONI

Sulla base delle indagini vibro-metriche effettuate e delle relative elaborazioni analitiche è possibile effettuare le seguenti considerazioni.

In riferimento alla norma UNI9614:1990 i livelli di *accelerazione massima* rilevati nelle postazioni di misura risultano essere superiori al valore limite solo sulla prima terna (a 5 metri, pertanto in una fascia non interessata dalla presenza di ricettori); non risultano invece superamenti per i livelli equivalenti per tutte e tre le terne installate.