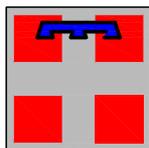


# AUTOSTRADA ASTI - CUNEO S.p.A.



PROVINCIA DI ASTI



REGIONE PIEMONTE



PROVINCIA DI CUNEO

## COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE ASTI - CUNEO

TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)

LOTTO 6 RODDI - DIGA ENEL

VERIFICA DI ASSOGGETTABILITA' EX ART. 20 D.LGS. 152/06

### VIBRAZIONI

### ANALISI AMBIENTALE OPERE IN VARIANTE

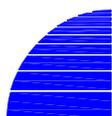
Aggiornato: 00	Data : Marzo 2014	Descrizione: EMISSIONE	Redatto: Ing. Bertetti	Controllato: Ing. Spoglianti	Approvato: Ing. Ghislandi	Codifica: 2.6 E - r V.1.1.09 Lotto Prog. Tipo Elaborato
Aggiornato:	Data :	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Data: MARZO 2014
Aggiornato:	Data :	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Scala: -



PROGETTISTA e RESP. INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Dott. Ing. Enrico Ghislandi  
Albo di Milano  
N° A 16993

CONCESSIONARIA:



AUTOSTRADA ASTI - CUNEO S.p.A.



## **AUTOSTRADA ASTI-CUNEO S.p.A.**

### **Collegamento autostradale Asti-Cuneo**

#### **Tronco II Lotto 6 Roddi - Diga Enel**

### **VERIFICA DI ASSOGGETTABILITA' EX ART. 20 D.LGS. 152/06**

#### **VIBRAZIONI**

#### **Analisi ambientale opere in variante**

0	Marzo 2014	Prima emissione	Ing. Bertetti	Ing. Spoglianti	Ing. Ghislandi	
<b>Rev.</b>	<b>Data</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Redatto</b>	<b>Controllato</b>	<b>Approvato</b>	
Attività: A.400.S.100.E6			Documento: 2.6E-rV.1.1.09-00			

## INDICE

<b>1. PREMESSA</b> .....	<b>3</b>
<b>2. ANALISI CONOSCITIVA E STATO DELLA COMPONENTE</b> .....	<b>4</b>
2.1. INQUADRAMENTO NORMATIVO.....	4
2.1.1. <i>Disturbo vibrazionale alle persone</i> .....	4
2.1.2. <i>Danni agli edifici</i> .....	10
2.1.3. <i>Esposizione delle apparecchiature sensibili alle vibrazioni (ISO/TS 10811-2:2000)</i> .....	16
2.1.4. <i>Richiami al contesto normativo per quanto riguarda il rumore solido</i> .....	18
2.2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE E DEFINIZIONE DELL'AREA DI STUDIO .....	20
2.3. MONITORAGGIO ANTE OPERAM .....	21
2.3.1. <i>Strumentazione impiegata e tipologia dei rilievi</i> .....	23
2.3.2. <i>Sintesi dei rilievi</i> .....	24
2.4. CARATTERIZZAZIONE GEOLITOLOGICA .....	27
2.5. DEFINIZIONE DELLE CLASSI DI SENSIBILITA'.....	28
<b>3. QUADRO DI RIFERIMENTO PREVISIONALE</b> .....	<b>30</b>
3.1. CARATTERISTICHE DEL FENOMENO FISICO .....	30
3.1.1. <i>Propagazione delle vibrazioni tra sorgente e ricettore</i> .....	31
3.1.2. <i>Propagazione nelle strutture edilizie</i> .....	37
3.2. ANALISI DEGLI IMPATTI .....	43
3.2.1. <i>Lo scavo con TBM</i> .....	43
3.2.2. <i>Lo scavo con martellone</i> .....	50
3.2.3. <i>Stime dei livelli vibrazionali</i> .....	52
3.3. VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI .....	56
<b>4. CONCLUSIONI</b> .....	<b>58</b>

**Allegato 1:** Verifiche previsionali

## 1. PREMESSA

La presente relazione illustra, per la componente Vibrazioni, le analisi e valutazioni ambientali che attengono alle modifiche progettuali subentrate dal progetto definitivo, sul quale si è espresso il MATTM con il DEC-VIA n.576 del 28.10.2011, al progetto esecutivo adeguato al DEC-VIA ed alle successive richieste del MIT-SVCA.

In particolare, le principali modifiche introdotte con la redazione del progetto esecutivo e nel seguito analizzate in termini di impatto vibrazionale in riferimento alla valutazione del disturbo per le persone esposte all'interno degli edifici hanno riguardato lo scavo meccanizzato delle due canne della Galleria Verduno mediante l'impiego della TBM-EPM, anziché in tradizionale come previsto nel Progetto Definitivo.

L'adozione della tecnica di scavo con TBM-EPM ha comportato di conseguenza anche la modifica del tipo e ampiezza della sezione di scavo e della cantierizzazione associata. Inoltre, sarà prevista la realizzazione di un cunicolo esplorativo provvisorio di appoggio allo scavo meccanizzato, da eseguire in anticipo rispetto alla partenza della TBM, dal quale eseguire le indagini e gli eventuali interventi.

Il potenziale di impatto delle suddette attività di scavo sui ricettori, inteso come immissione negli edifici di vibrazioni e di rumore trasmesso per via solida, è sostanzialmente determinato dalla geometria sorgente-ricettore, dal mezzo geolitologico e dalle caratteristiche strutturali dell'edificio.

Le verifiche nel seguito esposte sono basate sul calcolo previsionale della propagazione delle vibrazioni tra sorgente e ricettore, considerando le caratteristiche di smorzamento del terreno e i fenomeni primari di amplificazione e attenuazione all'interno dell'edificio.

Le emissioni sono state definite in base a evidenze sperimentali tratte da lavorazioni analoghe, con particolare riferimento ai lavori svolti per la metropolitana di Torino e di Bologna.

La verifica positiva dei limiti normativi applicabili al disturbo da vibrazioni (UNI 9614), che nel caso di ricettori sensibili è basata sulla soglia di percezione delle vibrazioni,  $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$  (74 dB) per l'asse verticale e  $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$  (71 dB) per gli assi orizzontali X-Y, garantisce l'assenza di danni. I valori di soglia per le fessurazioni sono infatti abbondantemente superiori alla soglia di percezione umana.

Per la stima degli impatti si è fatto ricorso alla stessa metodologia utilizzata nel SIA.

## 2. ANALISI CONOSCITIVA E STATO DELLA COMPONENTE

### 2.1. INQUADRAMENTO NORMATIVO

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 e del danno in edifici interessati da fenomeni vibrazionali.

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".

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 vengono richiamate le norme DIN 4150 e BS 7385. Nel mese di Aprile 2004 è stata pubblicata la norma UNI9916:2004 in revisione della norma UNI9916:1991. La norma già nella versione del 1991 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.

#### 2.1.1. Disturbo vibrazionale alle persone

Per quanto riguarda il disturbo vibrazionale per la popolazione, in Italia si fa riferimento alla norma UNI 9614:1990 che è in buon accordo con i contenuti di altre norme internazionali ed europee.

La Norma UNI 9614:1990 era stata affiancata dalla norma UNI 11048:2003 (ritirata nel 2009) che si proponeva di raccogliere elementi utili – secondo un protocollo di misure e di modalità di conduzione delle misure in campo – per valutare il disturbo arrecato ai soggetti esposti.

La Norma UNI 9614:1990 è attualmente in fase di revisione in sede UNI e il gruppo di lavoro che sta elaborando un aggiornamento della norma sta valutando sia il fatto che l'ultima versione della ISO 2631-2:2003 non fornisce i livelli di vibrazione di riferimento per la valutazione del disturbo (livelli che invece erano forniti dalla precedente ISO 2631-2:1989 e sia le attuali tendenze delle norme straniere (in particolare la Norma DIN 4150-2:1999 e la Norma NE 8179).

Nel seguito viene data una breve descrizione delle norme citate.

#### 2.1.1.1. Norma ISO2631/2

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 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 (i valori numerici delle curve base sono riportati in Figura 2-1 e Figura 2-3). 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); i valori dei fattori di moltiplicazione sono indicati in Figura 2-4.

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.

Frequenza [Hz]	Accelerazione in $m/s^2 \cdot 10^{-3}$		
	Asse Z	Assi X-Y	Assi combinati
1	10.00	3.60	3.60
1.25	8.90	3.60	3.60
1.6	8.00	3.60	3.60
2	7.00	3.60	3.60
2.5	6.30	4.51	3.72
3.15	5.70	5.68	3.87
4	5.00	7.21	4.07
5	5.00	9.02	4.30
6.3	5.00	11.40	4.60
8	5.00	14.40	5.00
10	6.30	18.00	6.30
12.5	7.81	22.50	7.80
16	10.00	28.90	10.00
20	12.50	36.10	12.50
25	15.60	45.10	15.60
31.5	19.70	56.80	19.70
40	25.00	72.10	25.00
50	31.30	90.20	31.30
63	39.40	114.00	39.40
80	50.00	144.00	50.00

Figura 2-1 Valori numerici per le curve base delle accelerazioni (ISO 2631-2)

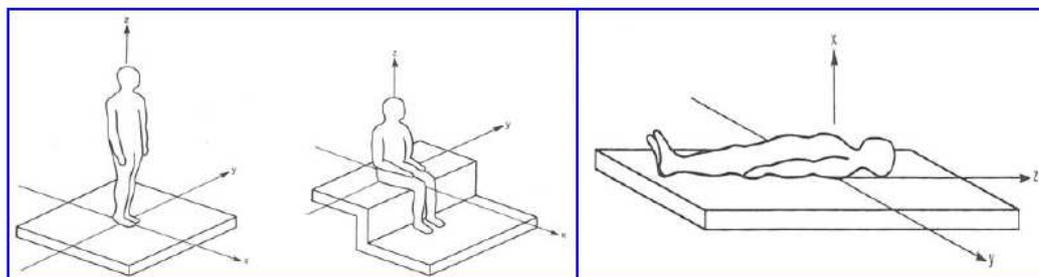


Figura 2-2 Rappresentazione delle tre componenti in funzione della posizione del corpo

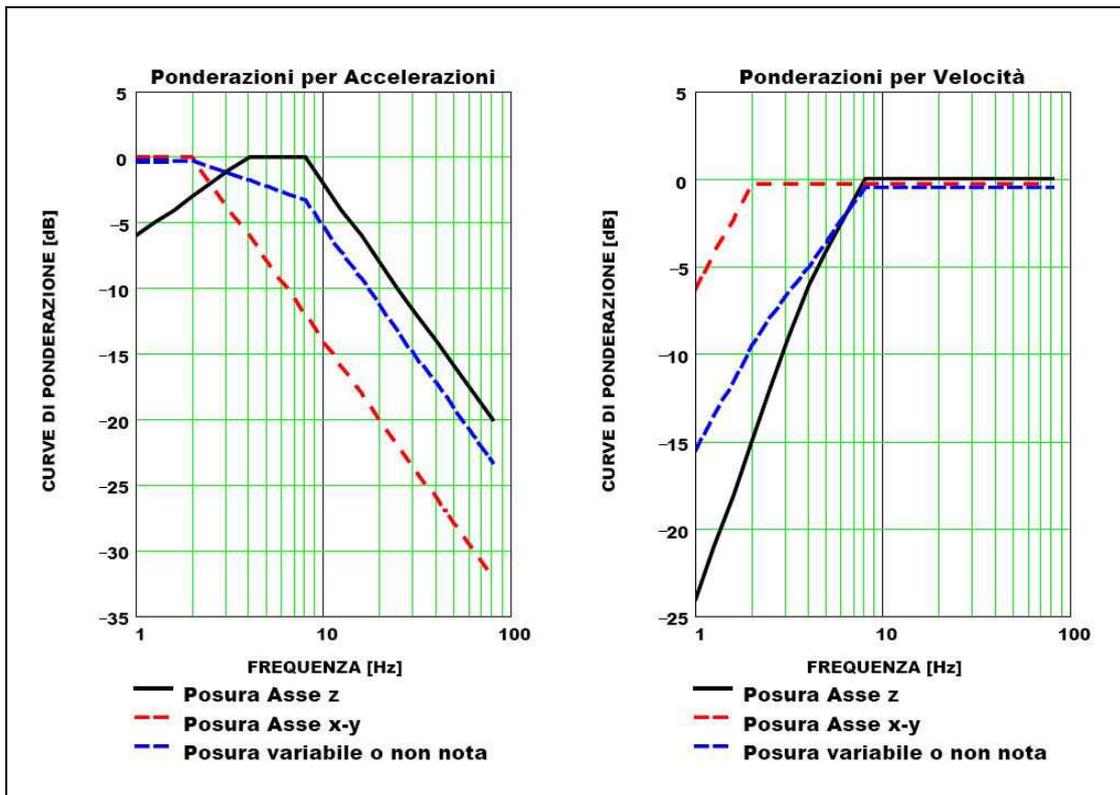


Figura 2-3 Curve di ponderazione (ISO) per le vibrazioni lungo gli assi verticali, orizzontali e per postura non nota per le frequenze da 1 Hz a 80 Hz

Destinazione d'uso	Periodo	vibrazioni continue	
		intermittenti	vibrazioni transitorie
Luoghi di lavoro critici (camere operatorie, laboratori di precisione, teatri, ecc.)	Giorno		
	Notte	1	1
Edifici residenziali	Giorno	2÷4	30÷90
	Notte	1.4	1.4÷20
Uffici	Giorno	4	60÷128
	Notte		
Luoghi di lavoro	Giorno	8	90÷128
	Notte		

Figura 2-4 Fattori di moltiplicazione delle curve base (ISO 2631-2 Annex A)

#### 2.1.1.2. Norma UNI 9614

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  $L_w = 20 \log_{10} (a/10^{-6} \text{ ms}^{-2})$ .

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 una 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 sopraindi-cati; ai fini della valutazione del disturbo verrà considerato il livello dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza più elevato.

Nell'Appendice della norma UNI 9614, che non costituisce parte integrante della norma, si indica che la valutazione del disturbo associato alle vibrazioni di livello costante deve essere svolta confrontando i valori delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza, o i corrispondenti livelli più elevati riscontrati sui tre assi, con una serie di valori limite riportati nei prospetti II e III (Figura 2-5 e Figura 2-6).

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 di-minuito di 3 dB al fine di stimare il corrispondente livello efficace.

I limiti (Figura 2-7) possono essere adottati se il numero di eventi impulsivi giornalieri non è superiore a 3. Nel caso si manifestino più di 3 eventi impulsivi giornalieri i limiti fissati per le abitazioni, gli uffici e le fabbriche vanno diminuiti in base al numero di eventi e alla loro durata, moltiplicandoli per un fattore correttivo F. Nessuna riduzione può essere applicata per le aree critiche.

Nel caso di impulsi di durata inferiore a 1 s si deve porre  $F = 1.7 \cdot N^{-0.5}$ . Per impulsi di durata maggiore si deve porre  $F = 1.7 \cdot N^{-0.5} \cdot t^{-k}$ , con  $k = 1.22$  per pavimenti in calcestruzzo e  $k = 0.32$  per pavimenti in legno. Qualora i limiti così calcolati risultassero inferiori ai limiti previsti per le vibrazioni di livello stazionario, dovranno essere adottati questi ultimi valori.

DESTINAZIONE D'USO	$a_w$ [m/s <sup>2</sup> ]	$L_w$ [dB]
Aree critiche	$5.0 \times 10^{-3}$	74
Abitazioni (Notte)	$7.0 \times 10^{-3}$	77
Abitazioni (Giorno)	$10.0 \times 10^{-3}$	80
Uffici	$20.0 \times 10^{-3}$	86
Fabbriche	$40.0 \times 10^{-3}$	92

Figura 2-5 Limite UNI 9614 delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza, di livello costante e non costante, validi per l'asse Z

DESTINAZIONE D'USO	$a_w$ [m/s <sup>2</sup> ]	$L_w$ [dB]
Aree critiche	$3.6 \times 10^{-3}$	71
Abitazioni (Notte)	$5.0 \times 10^{-3}$	74
Abitazioni (Giorno)	$7.2 \times 10^{-3}$	77
Uffici	$14.4 \times 10^{-3}$	83
Fabbriche	$28.8 \times 10^{-3}$	89

Figura 2-6 Limite UNI 9614 delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza, di livello costante e non costante, validi per gli assi X-Y

DESTINAZIONE D'USO	$a_w$ (Z) [m/s <sup>2</sup> ]	$a_w$ (X-Y) [m/s <sup>2</sup> ]
Aree critiche	$5.0 \times 10^{-3}$	$3.6 \times 10^{-3}$
Abitazioni (Notte)	$7.0 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-3}$
Abitazioni (Giorno)	0.30	0.22
Uffici	0.64	0.46
Fabbriche	0.64	0.46

Figura 2-7 Limiti delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza in presenza di vibrazioni impulsive

## 2.1.2. Danni agli edifici

### 2.1.2.1. Norma UNI 9916

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 vengono richiamate le norme DIN 4150 e BS 7385. Nel mese di Aprile 2004 è stata pubblicata la norma UNI9916:2004 in revisione della norma UNI9916:1991. La norma già nella versione del 1991 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. Nella revisione del 2004 la norma si amplia in taluni aspetti descrittivi ed informativi relativi alle caratteristiche generali del fenomeno vibratorio, alle caratteristiche degli edifici rilevanti ai fini della valutazione della risposta, alla misurazione delle vibrazioni e al trattamento dei dati. E' stata invece rimossa l'Appendice relativa alla classificazione degli edifici secondo la resistenza meccanica alle vibrazioni, che teneva conto di fattori quali il tipo di costruzione, il tipo di fondazione, il tipo di terreno, ecc. L'appendice non costituiva in realtà parte integrante della norma, ma aveva carattere informativo. Il confronto normativo permette inoltre di constatare alcune diversità negli intervalli di frequenza caratteristici delle sorgenti di vibrazioni, come evidenziato in Figura 2-8.

Sorgente di vibrazioni	Gamma di frequenza [Hz]	
	UNI9916: 1991	UNI9916: 2004
Traffico (su strada e su rotaia)	Da 1 a 80	Da 1 a 300
Esplosioni	Da 1 a 300	Da 1 a 300
Battitura di pali	Da 1 a 100	Da 1 a 100
Demolizioni (caduta edificio)	-	Da 1 a 20
Macchine esterne all'edificio	Da 1 a 300	Da 1 a 300
Macchine interne all'edificio	Da 1 a 1000	Da 1 a 300
Attività umane (movimento di persone all'interno dell'edificio)	-	Da 0,1 a 100
Attività umane interessanti indirettamente l'edificio	Da 0,1 a 100	-
Attività umane interessanti direttamente l'edificio	Da 0,1 a 12	-
Vento	Da 0,1 a 10	Da 0,1 a 2

*Figura 2-8 Intervalli di frequenza caratteristici delle sorgenti di vibrazione*

La revisione del 2004 amplia l'appendice informativa relativa ai valori di riferimento per la valutazione degli effetti delle vibrazioni, che hanno carattere indicativo e non possono essere considerati come limiti assoluti di accettabilità o non accettabilità. In particolare vengono riportate le indicazioni essenziali delle DIN 4150 e BS 7385, della BS 5228-4 relativa agli effetti sugli edifici delle vibrazioni indotte dalla battitura di pali ed i valori della SN 640312, relativa alle vibrazioni provocate nelle costruzioni dallo scoppio di mine, dalle attività di cantiere e dal traffico su strada e ferroviario.

La normativa definisce come parametro di riferimento per la valutazione degli effetti delle vibrazioni il massimo valore (o di picco) delle componenti delle velocità di vibrazione definito come Peak Component Particle Velocity (p.c.p.v.):

$$V_{picco} = \max \left[ \max(V_x), \max(V_y), \max(V_z) \right]$$

oppure il massimo valore (o di picco) del vettore velocità nel suo complesso istante per istante definito come Peak Particle Velocity (p.p.v.),

$$V_{picco} = \max \left[ \sqrt{V_x^2(t) + V_y^2(t) + V_z^2(t)} \right]$$

valutati alla fondazione (basamento) e sui solai ai vari piani.

Nell'Appendice D della norma vengono pertanto riportati i valori di riferimento per la p.p.v. e le p.c.p.v. indicati dalle sopra citate norme, differenziati per le varie tipologie di edifici e per la natura della vibrazione (continua o transitoria).

In generale, i valori di riferimento indicati sono quelli al di sotto dei quali, salvo casi particolari, è ragionevole presumere che non si abbiano danni; si specifica inoltre che il superamento dei limiti indicati non implica necessariamente il verificarsi del danno, ma è un segnale di necessità di indagini più approfondite.

Il danno a cui la norma fa riferimento è di tipo architettonico, secondo le seguenti definizioni.

**Danno di tipo architettonico (o di soglia):** Effetto residuo delle vibrazioni che determina alterazione estetica o funzionale dell'edificio senza compromettere 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 formazione di fessure più marcate, distacco a caduta di gesso o pezzi di intonaco fino al danneggiamento di elementi strutturali (per esempio fessure nei pilastri e nella travature, aperture dei giunti).

### 2.1.2.2. Valori di riferimento indicati dalle DIN 4150 e BS 7385

Entrambe fanno riferimento alla p.c.p.v. “peak component particle velocity”. Nei casi in cui il valore di riferimento fornito dalle norme, con il quale la p.c.p.v. deve essere confrontata, varia con la frequenza, si rende necessaria l'individuazione delle frequenze dominanti.

I valori di riferimento indicati sono quelli al di sotto dei quali, salvo casi particolari, è ragionevole presumere che non vi sia danno; il superamento degli stessi non implica necessariamente il verificarsi del danno, ma un segnale della necessità di analisi più approfondite.

La norma DIN 4150 considera tre classi di edifici (edifici industriali e simili, edifici residenziali e simili, altri edifici non industriali né residenziali da tutelare) e prevede la misurazione ed il controllo del livello di vibrazione sia in fondazione (per tutte e tre le componenti) che ai piani superiori, con particolare riferimento al piano più elevato per la componente orizzontale. Tali misurazioni forniscono un quadro della risposta globale dell'edificio; sono inoltre necessarie misurazioni relative alla risposta dei solai ai singoli piani, che possono essere limitate alla misurazione della componente verticale della velocità, registrata al centro del solaio.

I valori di riferimento sono distinti per vibrazioni di breve durata (cioè tali da escludere problemi di fatica e amplificazioni dovute a risonanza nella struttura interessata) e per vibrazioni durature.

I valori riportati nella Figura 2-9 sono relativi alle vibrazioni di breve durata e sono indicati per le misurazioni in fondazione e per la componente orizzontale della velocità ai piani superiori, con particolare riferimento al piano più elevato, mentre per la componente verticale dei singoli solai è suggerito un valore di 20 mm/s limitatamente alle prime due classi di edifici. Tale valore è indipendente dal contenuto in frequenza e può essere inferiore per la terza classe di edifici.

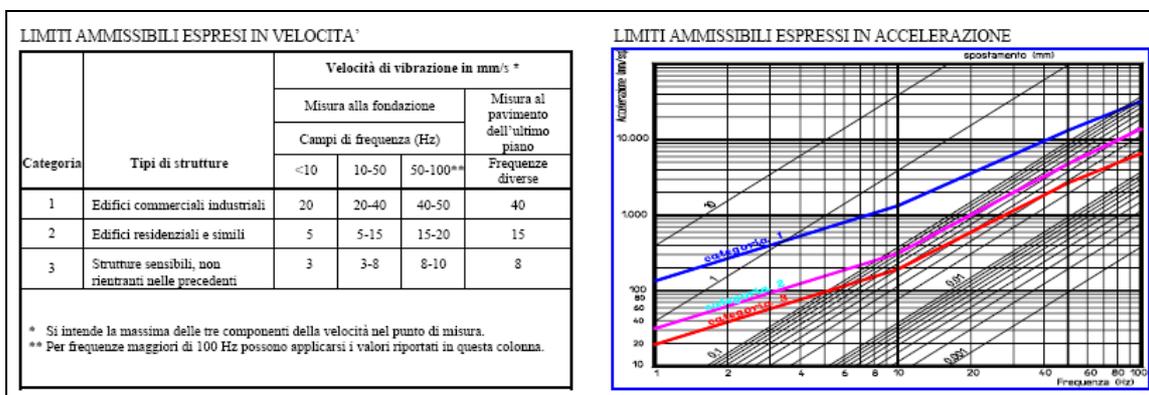


Figura 2-9 Valori di riferimento per la p.c.p.v. per vibrazioni di breve durata (DIN 4150)

In presenza di vibrazioni continue che possano indurre fenomeni di fatica o amplificazioni dovute a risonanza nella struttura interessata, i valori di riferimento sono quelli indicati nella Figura 2-10. Questi valori per componenti orizzontali e indipendenti dal contenuto in frequenza, sono utilizzabili per tutti i piani e per le fondazioni; in generale risulterà più significativa la misurazione al piano alto, ma non sono da escludere controllo ai piani intermedi o in fondazione qualora di vi sia la possibilità di risonanza.

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

Figura 2-10 Valori di riferimento per la p.c.p.v. per vibrazioni durature (DIN 4150)

Per la componente verticale dei singoli solai, la norma indica come valore di riferimento per la p.c.p.v. 10 mm/s limitatamente alle prime due classi di edifici. Tale valore è indipendente dal contenuto in frequenza e può essere inferiore per la terza classe di edifici, tanto che è frequente nella letteratura tecnica internazionale [L. DOMENICHINI, R.FERRO and F. LA TORRE 1999 Proceedings of the International Symposium on Environmental Impact of Road ;nevenness, Porto, 147-162. Vibrations produced by road traffic influence of road surface characteristics] l'impiego del valore di 1.0 mm/s anche per la componente verticale.

La norma BS 7385, parte 2 tratta solo il caso di vibrazioni trasmesse dal terreno, i valori di riferimento sono relativi a misurazioni in fondazione e applicabili solo ad edifici bassi (fino a 3 piani). I valori riportati in Figura 2-11, inoltre, riguardano vibrazioni transitorie che non danno luogo a risonanza nella struttura, nel qual caso devono essere ridotti del 50%.

La norma BS 5228 riguarda il controllo delle vibrazioni nel caso di battitura di pali e ha come grandezza di riferimento la "peak particle velocity", cioè il picco nel tempo del mo-dulo del vettore velocità, p.p.v., così come definito nella norma UNI9916:2004. La norma prescrive anche la misurazione delle vibrazioni ai piani alti dell'edificio. I valori indicati in Figura 2-12, al di sotto dei quali è ragionevole presumere che non si verifichi danno minore o "cosmetic" (cioè non strutturale), sono applicabili a tutti gli edifici ivi descritti nel caso di vibrazione transitoria; in caso di vibrazione continua i valori indicati devono essere ridotti del 50%.

Classe	Tipo di edificio	"Peak component particle velocity" nell'intervallo di frequenza dell'impulso predominante		
		Da 4 Hz a 15 Hz	Da 15 Hz a 40 Hz	Da 40 Hz a 250 Hz
1	Strutture a telaio o rinforzate. Edifici industriali e commerciali	50 mm/s		
2	Strutture non rinforzate. Edifici residenziali o piccoli edifici commerciali	Varia linearmente da 15 mm/s ( $f= 4$ Hz) fino a 20 mm/s ( $f= 15$ Hz)	Varia linearmente da 20 mm/s ( $f= 15$ Hz) fino a 50 mm/s ( $f= 40$ Hz)	50 mm/s
Nota 1 I valori indicati sono alla base dell'edificio. Nota 2 Per la classe 2, a frequenze minori di 4 Hz, non si deve superare uno spostamento massimo di 0,6 mm (da zero al picco).				

*Figura 2-11 Valori di riferimento per la p.c.p.v. per vibrazioni transitorie (BS 7385)*

Classe	Tipo di edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.p.v. in mm/s		
		Fondazioni		
		Da 1 Hz fino a 10 Hz <sup>*)</sup>	Da 10 Hz fino a 50 Hz	Da 50 Hz fino a 100 Hz <sup>*)</sup>
A	Edifici residenziali costruiti a regola d'arte ed in buono stato di conservazione	5	10	20
B	Edifici costruiti per uso industriale e commerciale con struttura relativamente snella	10	20	40
C	Edifici massicci e rigidi costruiti per uso industriale e commerciale	15	30	60
*) Indicazioni fornite per estrapolazione. I dati relativi all'installazione dei pali indicano che le frequenze di vibrazione prevalenti sono contenute nell'intervallo da 10 Hz a 50 Hz.				

*Figura 2-12 Valori di riferimento per la p.p.v. per vibrazioni transitorie (BS 5228)*

La norma SN 640312 riguarda le vibrazioni provocate nelle costruzioni dalle attività di macchine di cantiere, dal traffico su strada e ferroviario e dallo scoppio delle mine e con-sidera come grandezza di riferimento la "peak particle velocity". I valori di riferimento indicati in Figura 2-13 sono forniti in funzione della frequenza dominante della vibrazione, determinata dall'analisi spettrale della componente del vettore velocità con ampiezza maggiore.

Classe	Tipo di costruzione	Esposizione	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.p.v. in mm/s		
			Posizioni di misura <sup>*)</sup>		
			Da 8 Hz fino a 30 Hz <sup>*)</sup>	Da 30 Hz fino a 60 Hz	Da 60 Hz fino a 150 Hz
A	Costruzioni molto poco sensibili (per esempio ponti, gallerie, fondazioni di macchine)	Occasionale Frequente Permanente	Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C
B	Costruzioni poco sensibili (per esempio edifici industriali in cemento armato o metallici) costruiti a regola d'arte e con manutenzione adeguata	Occasionale Frequente Permanente	Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C
C	Costruzioni normalmente sensibili (per esempio edifici d'abitazione in muratura di cemento, cemento armato o mattoni, edifici amministrativi, scuole, ospedali, chiese in pietra naturale o mattoni intonacati) costruiti a regola d'arte e con manutenzione adeguata	Occasionale Frequente Permanente	15 6 3	20 8 4	30 12 6
D	Costruzioni particolarmente sensibili (per esempio monumenti storici e soggetti a tutela) case con soffitti in gesso, edifici della classe C nuovi o ristrutturati di recente	Occasionale Frequente Permanente	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà
*) Le posizioni di misura devono essere scelte sugli elementi rigidi della struttura portante o dove sono attesi i maggiori effetti delle vibrazioni.					

*Figura 2-13 Valori di riferimento per la p.p.v. (SN 640312)*

Siccome i dati di riferimento delle norme indicate sono espressi in termini di velocità vibratoria, è necessario, in caso di utilizzo di accelerometri, ricondurre le misure effettuate a questa grandezza cinematica mediante integrazione.

Nella norma UNI9916: 2004 è inserita un'Appendice informativa sui problemi legati alla determinazione della velocità e suggerita una possibile procedura per il rilievo e l'analisi di vibrazioni:

- Misurazione dell'accelerazione lungo i tre assi ortogonali.
- Integrazione delle componenti di accelerazione.
- Analisi spettrale della componente di velocità che risulta più severa in termini di ampiezza massima.

- Confronto dei valori di picco della velocità con i valori di riferimento, tenendo conto delle componenti in frequenza dominanti evidenziate dall'analisi spettrale.
- Se la differenza fra i due valori (di riferimento e misurato) è di almeno 10 dB, l'indagine si può ritenere conclusa. Altrimenti si procederà nel modo seguente:
- Analisi spettrale di ciascuna componente di velocità.
- Calcolo, per ogni istante, del modulo della somma vettoriale delle tre componenti di velocità e confronto con i valori di riferimento (BS 5228-4).

In alternativa si effettua il confronto, componente per componente, dei valori di picco della velocità con i valori di riferimento (DIN 4150 o BS 7385).

### **2.1.3. Esposizione delle apparecchiature sensibili alle vibrazioni (ISO/TS 10811-2:2000)**

Le norme ISO 10811-1 e ISO 10811-2 descrivono le modalità di misura, valutazione e classificazione delle vibrazioni e degli urti a carico di edifici che accolgono equipaggiamenti sensibili.

In particolare la norma ISO/TS 10811-1 definisce un metodo per la classificazione degli urti e delle vibrazioni negli edifici a partire da misure. Il sistema di classificazione delle condizioni di vibrazioni ambientali rappresenta una linea guida per i progettisti, costruttori e utilizzatori di attrezzature sensibili agli urti e alle vibrazioni, e per i costruttori di immobili.

Vengono considerati gli urti e le vibrazioni che, da solai, tavoli, pareti, soffitti o dai sistemi di smorzamento, ecc., vengono trasmessi ad una attrezzatura sensibile. Le sorgenti possono essere classificate in tre tipologie:

- Sorgenti esterne, ad esempio il traffico stradale, ferroviario o aereo, i lavori di costruzione (realizzazione pali di fondazione, demolizioni, ecc.).
- Attrezzature e macchine per uso industriale collocate all'interno degli edifici, come ad esempio presse, martelli, attrezzature rotanti, movimentazione carroporti, ecc.
- Attività umane correlate all'utilizzo delle attrezzature sensibili, come ad esempio il calpestio su pavimenti, in particolare quelli galleggianti.

Il campo di frequenze di interesse è compreso tra 2 Hz e 200 Hz, anche se normalmente le frequenze dominanti si collocano al di sotto dei 100 Hz perché rappresentano la risposta dell'edificio alle sollecitazioni dinamiche.

I criteri di velocità vibrazionale massima ammissibile per la strumentazione di precisione sono basati sul riconoscimento dei singoli eventi disturbanti determinati dalla singola sorgente. Questo è giustificato dal fatto che è molto poco probabile che due eventi di differente origine, anche se generati nello stesso istante temporale, possano essere coerenti in fase e quindi considerati additivi.

Generalmente i manuali operativi delle case costruttrici contengono informazioni dettagliate in merito ai livelli massimi ammissibili di vibrazione.

In assenza di informazioni più dettagliate la Figura 2-14 e la Figura 2-15 forniscono gli orientamenti in merito ai criteri di protezione da applicare alle apparecchiature sensibili.

Le curve VC (Vibration Criteria) sono ampiamente utilizzate nelle aziende nel campo della microelettronica e attività simili. Le curve hanno un campo di velocità costante (in termini di valore r.m.s. in terze di ottava) da 8 Hz a 100 Hz. Al di sotto di 8 Hz le curve VC forniscono un valore di velocità costante.

I numeri contenuti in Figura 2-14 sono applicabili per il campo frequenza in cui la velocità è costante. In accordo con la ISO/TS 10811-1 la velocità di picco corrispondente può essere stimata per forme d'onda sinusoidali e per vibrazioni casuali. In questo ultimo caso la stima è fornita per un tempo di esposizione di 10 minuti ed è riferita a due frequenze di terze d'ottava, la prima a 8 Hz e la seconda a 100 Hz.

Le classi di strumentazioni/apparecchiature sensibili associate alle curve A, B, C, D e E, ordinate per sensibilità decrescente, considerano valori di velocità di picco ammissibile fino a 50  $\mu\text{m/s}$  per microscopi ottici, bilance di precisione, bilance ottiche, ecc (curva A) e valori minimi pari a 3  $\mu\text{m/s}$  per i sistemi che richiedono una straordinaria stabilità dinamica, come ad esempio i sistemi di puntamento laser per le grandi distanze (Curva E).

VC curve	R.m.s. velocity $\mu\text{m/s}$	Peak velocity for sine waves mm/s	Peak velocity for random vibration (10 min) mm/s	
			8 Hz	100 Hz
A	50	0,071	0,22	0,25
B	25	0,035	0,11	0,12
C	12,5	0,018	0,056	0,062
D	6	0,0085	0,027	0,030
E	3	0,0042	0,013	0,015

Figura 2-14 Velocità di picco per curve limite

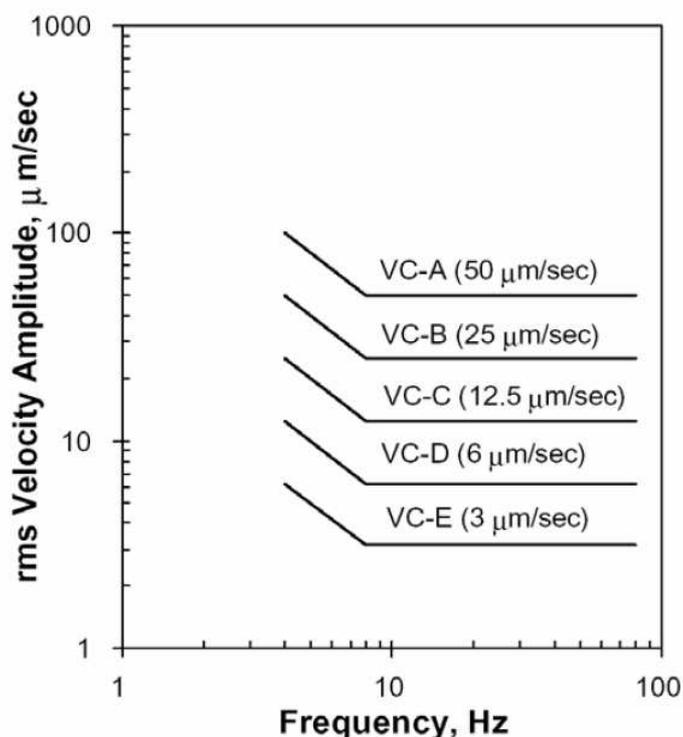


Figura 2-15 Curve limite velocità di picco

#### 2.1.4. Richiami al contesto normativo per quanto riguarda il rumore solido

In Italia sono da alcuni anni in vigore specifici provvedimenti legislativi destinati ad affrontare il problema dell'inquinamento acustico nell'ambiente esterno.

La disciplina in materia di lotta contro il rumore precedentemente al 1991 era affidata ad una serie eterogenea di norme a carattere generale, che tuttavia non erano accompagnate da una normativa tecnica che consentisse di applicare concretamente le prescrizioni stesse.



Con il DPCM 1 Marzo 1991 il Ministero dell'Ambiente, di concerto con il Ministero della Sanità, ha predisposto uno strumento legislativo che disciplina il rumore e sottopone a controllo l'inquinamento acustico, in attuazione del DPR 616/1977 e della Legge 833/1978.

Successivamente a questo DPCM sono state emesse ulteriori norme che hanno ulteriormente completato il quadro normativo, in particolare la Legge Quadro sull'inquinamento acustico (Legge n. 447 del 26 ottobre 1995) e il DCPM 14 novembre 1997.

La Legge n° 447 del 26/10/1995 "Legge Quadro sull'inquinamento acustico", pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale n° 254 del 30/10/1995, è una legge di principi e demanda perciò a successivi strumenti attuativi la puntuale definizione sia dei parametri sia delle norme tecniche.

Un aspetto innovativo della Legge Quadro è l'introduzione all'Art. 2, accanto ai valori limite, dei valori di attenzione e dei valori di qualità. Nell'Art. 4 si indica che i comuni "procedono alla classificazione del proprio territorio nelle zone previste dalle vigenti disposizioni per l'applicazione dei valori di qualità di cui all'Art. 2, comma 1, lettera h".

La Legge stabilisce inoltre che le Regioni, entro un anno dall'entrata in vigore, devono definire i criteri di zonizzazione acustica del territorio comunale fissando il divieto di contatto diretto di aree, anche appartenenti a comuni confinanti, quando i valori di qualità si discostano in misura superiore a 5 dBA.

L'adozione della zonizzazione acustica è il primo passo concreto con il quale il Comune esprime le proprie scelte in relazione alla qualità acustica da preservare o da raggiungere nelle differenti porzioni del territorio comunale e altresì il momento che presuppone la tempestiva attivazione delle funzioni pianificatorie, di programmazione, di regolamentazione, autorizzatorie, ordinarie, sanzionatorie e di controllo nel campo del rumore indicate dalla Legge Quadro.

Il DPCM 14 novembre 1997 "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore" integra le indicazioni normative in tema di disturbo da rumore espresse dal DPCM 1 marzo 1991 e dalla successiva Legge Quadro n° 447 del 26 ottobre 1995 e introduce il concetto dei valori limite di emissione, nello spirito di armonizzare i provvedimenti in materia di limitazione delle emissioni sonore alle indicazioni fornite dall'Unione Europea.

Il decreto determina i valori limite di emissione, i valori limite di immissione, i valori di attenzione ed i valori di qualità, riferendoli alle classi di destinazione d'uso del territorio, riportate nella Tabella A dello stesso decreto e che corrispondono sostanzialmente alle classi previste dal DPCM 1 marzo 1991.

Inoltre si esplicitano i valori limite differenziali di immissione, che sono 5 dB per il periodo diurno e 3 dB per il periodo notturno, all'interno degli ambienti abitativi.

Tali valori non si applicano nelle aree in Classe VI. Tali disposizioni non si applicano nei seguenti casi: se il rumore misurato a finestre aperte è inferiore a 50 dBA durante il periodo diurno e 40 dBA durante il periodo notturno; se il rumore ambientale misurato a finestre chiuse è inferiore a 35 dBA durante il periodo diurno e 25 dBA durante il periodo notturno.

Le disposizioni relative ai valori limite differenziali di immissione non si applicano alla rumorosità prodotta dalle infrastrutture stradali, ferroviarie, aeroportuali, marittime, da attività e comportamenti non connessi con esigenze produttive, commerciali, professionali, da servizi ed impianti fissi dell'edificio adibiti ad uso comune, limitatamente al disturbo provocato all'interno dello stesso.

*Nel caso specifico inerente la costruzione di una infrastruttura stradale interrata, si applicano i valori limite differenziali di immissione, pari a 5 dB per il periodo diurno e 3 dB per il periodo notturno, all'interno degli ambienti abitativi. Tali valori non si applicano nelle aree in Classe VI e nel caso in cui il rumore solido è inferiore a 35 dBA durante il periodo diurno e 25 dBA durante il periodo notturno.*

## **2.2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE E DEFINIZIONE DELL'AREA DI STUDIO**

Il tratto autostradale in esame, il sesto lotto del tronco II dell'autostrada, ha inizio nel Comune di Cherasco e termina in Comune di Roddi dopo aver attraversato il Comune di Verduno. Le opere più importanti e/o impegnative previste per il lotto riguardano l'attraversamento in galleria della zona collinare dei comuni di Verduno e La Morra; lo svincolo e barriera di Verduno-Roddi; il ponte sul torrente Talloria.

Per la definizione del sistema ricettore, è stata svolta un'attività di censimento, tramite interpretazione cartografica e specifici sopralluoghi, che hanno permesso di rilevare le destinazioni d'uso reali dei fabbricati e la loro consistenza volumetrica in un corridoio di indagine esteso a 500 metri per lato dell'infrastruttura in progetto. La classificazione primaria ha riguardato la distinzione tra edifici ad uso residenziale o prevalentemente residenziale e edifici destinati ad attività produttive, commerciali o terziarie.

Sono stati altresì identificati gli edifici sensibili, quali scuole, ospedali, case di cura e di riposo, in un ambito territoriale più vasto, di ampiezza doppia rispetto alla fascia di pertinenza per un'estensione complessiva di 1 km a cavallo dell'infrastruttura in progetto.

In particolare, nel tratto autostradale in galleria (Galleria Verduno) interessato pertanto dalle attività di scavo, sono stati identificati prevalentemente edifici

residenziali di 2 piani alcuni isolati altri facenti parte di borgate, mentre insediamenti industriali/artigianali si concentrano nel territorio alla fine della galleria lato Asti lungo la SP7.

Si segnala inoltre la presenza di un ricettore sensibile nell'ambito di indagine, in corso di realizzazione e precisamente il futuro ospedale di Alba-Bra, il cui ingombro planimetrico ricade a circa 250 metri dal confine stradale di progetto.

Le uniche sorgenti di vibrazioni esistenti sono rappresentate dalle viabilità SP58 e SP7, lungo cui si affacciano alcuni dei ricettori individuati nell'ambito di studio interessato dalle lavorazioni di scavo.

### **2.3. MONITORAGGIO ANTE OPERAM**

Nel seguito vengono riportati gli esiti dei rilievi funzionali alla caratterizzazione delle velocità delle vibrazioni esistenti nello scenario di stato attuale. Le indagini sono state eseguite secondo le modalità illustrate dal Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA) e di quanto concordato con ARPA Piemonte. Quanto documentato è tratto dalla relazione *2.6-0-rM.9.1.1.1.a "Monitoraggio ambientale ante operam Componente Vibrazioni Relazione Tecnica"*.

Il monitoraggio Ante Operam è stato focalizzato sull'area interessata dalla realizzazione della galleria di Verduno, che costituisce la sorgente di vibrazioni alla quale è associata la massima energia rispetto a quelle connesse alla realizzazione delle altre opere previste in progetto.

Per la scelta dei recettori oggetto del monitoraggio, è stato tenuto conto degli altri principali fattori, che influenzano l'ampiezza delle vibrazioni indotte sulle strutture e il disturbo alle persone, ovvero la distanza sorgente-recettore, la velocità di propagazione delle vibrazioni attraverso il terreno, la tipologia strutturale e lo stato di conservazione degli edifici.

Sono stati quindi selezionati gli 8 punti di monitoraggio documentati, corrispondenti agli edifici più prossimi agli assi delle canne della galleria, e rappresentativi delle diverse tipologie strutturali/architettoniche presenti nella zona e nelle aree considerate più vulnerabili. La velocità di propagazione delle vibrazioni attraverso il terreno, direttamente correlata alla caratterizzazione geologica del sito, non ha costituito una discriminante di selezione dei recettori, in quanto lungo gli assi delle canne della galleria i recettori selezionati ricadevano su aree omogenee.

La selezione dei punti condivisa durante i tavoli tecnici è stata successivamente condivisa con ARPA in sede dei sopralluoghi tenutosi in data 13 Giugno 2012 e 1 Agosto 2012.

In Figura 2-16 e Figura 2-17 sono riportate rispettivamente le campagne di misura e la localizzazione dei punti.

Codice identificativo	Periodo di misura	
	Inizio	Fine
VIB-MO-005	16 ottobre 2012	23 ottobre 2012
VIB-MO-020	23 ottobre 2012	30 ottobre 2012
VIB-MO-070	30 ottobre 2012	6 novembre 2012
VIB-MO-040	6 novembre 2012	13 novembre 2012
VIB-MO-050	13 novembre 2012	20 novembre 2012
VIB-MO-030	20 novembre 2012	28 novembre 2012
VIB-MO-060	28 novembre 2012	5 dicembre 2012
VIB-VE-010	5 dicembre 2012	6 dicembre 2012

Figura 2-16 Campagne di monitoraggio

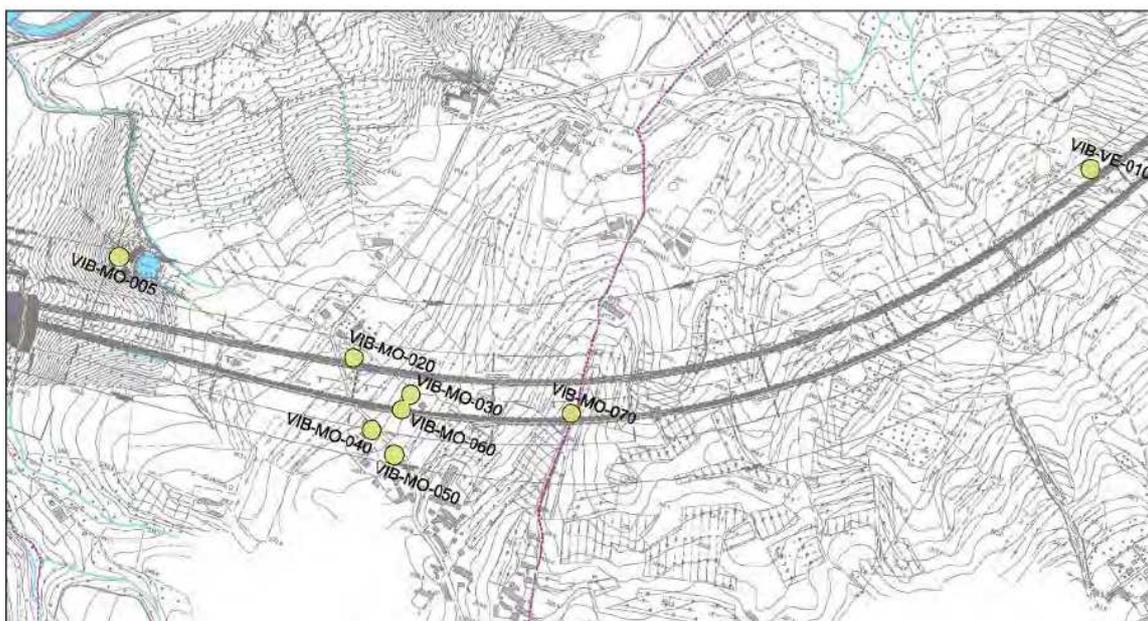


Figura 2-17 Localizzazione punti di monitoraggio ante operam

### 2.3.1. Strumentazione impiegata e tipologia dei rilievi

Per ciascun edificio oggetto del monitoraggio, è stato allestito un sistema ad hoc per la registrazione dei valori di picco delle velocità (Peak Particle Velocity: PPV). La misurazione è stata eseguita in simultanea per le 3 componenti di velocità (Peak Component Particle Velocity: PCPV) con la seguente strumentazione:

- Centralina di acquisizione dinamica DYMAS 24 a 12 canali;
- Sismometri triassiali VELOGET 3D di classe I, conforme alle normative DIN4150-3, DIN45669-1, UNI9916 e UNI9614;
- Sistema per la registrazione e l'elaborazione dei dati (Laptop con installati software DYMASOFT per la gestione e lo scarico dei dati e software VIBROSOFT per l'elaborazione dei dati).

La tipologia e la sensibilità minima dei trasduttori da impiegare per il monitoraggio è stata concordata ARPA Piemonte. In Figura 2-18 sono rappresentati rispettivamente la centralina di acquisizione e i sismometri impiegati.

Come previsto dal PMA sono stati impiegati contemporaneamente 2 sismometri: il primo ubicato all'ultimo piano, e posizionato nel centro del solaio (P.A.) del locale più ampio, il secondo a piano campagna in corrispondenza delle strutture di fondazione (P.B.). I sismometri sono stati orientati con l'asse y ortogonale alle pareti in corrispondenza delle fondazioni, l'asse z ortogonale al piano della struttura considerata.

Per l'installazione dei sismometri (tipo Veloget 3D) non è stato necessario predisporre un fissaggio particolare, in quanto si tratta di trasduttori di velocità di grosse dimensioni, con estesa superficie di appoggio e con livelli di accelerazione minori di  $1\text{m/s}^2$  (rif. UNI 9916:2004).

Le tipologie di misura eseguite sono:

1. misura dei valori di picco delle velocità, per un periodo di durata minima pari a 7 giorni, con restituzione dei valori di picco ogni 10 secondi per ogni singola componente del vettore velocità (P.C.P.V.);
2. misura in continuo, presenziata da rilevatore, eseguita il giorno del "setup" della strumentazione. L'intervallo di campionamento della misura in continuo è stata impostata su  $2 \cdot 10^{-3}$  s.

Unica eccezione per il punto VIB-VE-010 in cui, in accordo con la concessionaria, la registrazione dei valori di picco delle velocità ha avuto una durata di soli 2 giorni presenziato da rilevatore in campo, essendo il recettore una abitazione abbandonata al momento del sopralluogo e del monitoraggio.

Durante le misure in continuo sono state annotate le attività che potevano influenzare il clima vibrazionale locale (traffico, movimentazione mezzi agricoli e mezzi pesanti, passi, ecc.).



Figura 2-18 Centralina di acquisizione DYMAS 24 e Sismometro VELOGET3D

### 2.3.2. Sintesi dei rilievi

I rilievi hanno consentito le seguenti analisi:

- Confronto dei valori di picco delle velocità registrate con i valori di riferimento della velocità di vibrazione al fine di valutare gli effetti delle azioni di breve durata sulle costruzioni;
- Analisi nel dominio delle frequenze per tutti i recettori in esame;
- Calcolo dei valori delle accelerazioni ed elaborazione degli indicatori fisici per la valutazione del disturbo vibrazionale sulle persone.

La sintesi dei rilievi è riportata nella Tabella 2-1 per quanto riguarda il danno agli edifici e nella Tabella 2-2 per quanto riguarda la valutazione del disturbo alle persone.

Valori massimi di picco (mm/s)									
Punto	Piano	X	Y	Z	Val. Rif.	Frequenza dominante (Hz)			Sorgenti rilevate (Evento massimo)
						X	Y	Z	
VIB-MO-005	Alto	0.3120	0.1645	6.6106	15	4.9	9.3	9.4	Passi, Passaggi mezzi agricoli, muletto (Passi)
	Basso	0.1191	0.0932	0.1354	5	4.6	9.4	9.4	
VIB-MO-020	Alto	0.2477	0.2512	0.4641	15	10.6	10.4	19.8	Passi, mezzi agricoli e mezzi pesanti su SP58 (Mezzo pesante)
	Basso	0.0527	0.1508	0.1373	5	10.4	9.2	16.9	
VIB-MO-070	Alto	3.3659	2.2866	4.0974	15	7.1	7.6	16.7	Passi, Passaggi mezzi agricoli antistanti (Mezzo agricolo)
	Basso	0.0953	0.1348	0.0800	5	7.1	7.2	16.6	
VIB-MO-040	Alto	1.7522	1.4031	2.3693	15	12.8	13.6	13.7	Passi, Traffico veicolare SP58 (Passi)
	Basso	0.1817	0.1690	0.3067	5	10.0	9.9	13.2	
VIB-MO-050	Alto	0.3938	0.5746	1.1963	15	7.2	7.9	21	Passi, Traffico veicolare SP58, (Passi, mezzo pesante)
	Basso	0.1911	0.2291	0.2338	5	9.4	10.4	10.0	
VIB-MO-030	Alto	2.5852	1.5750	3.0926	15	9.9	12.1	9.9	Passi, Traffico veicolare SP58 (Passi)
	Basso	0.0978	0.0846	0.0453	5	9.9	9.6	9.9	
VIB-MO-030	Alto	0.3006	0.4414	0.4728	15	10.1	10.7	10.6	Passi, traffico veicolare SP58 (Passi)
	Basso	0.4085	0.7746	0.2403	5	8.2	8.1	10.8	
VIB-VE-010	Alto	0.0585	0.0704	0.3430	15	24.8	19.9	16.6	Passi, Passaggio mezzi agricoli (Passi)
	Basso	0.0301	0.0376	0.0560	5	19.5	32.4	32.4	

*Tabella 2-1 Sintesi valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici (UNI 9916)*



Livelli di accelerazione Complessivi Ponderati in Frequenza assi combinati UNI9614 (dB)									
Punto	Piano Alto			Piano Basso			Valore di riferimento (UNI 9614)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	Abitazioni giorno (7-22)	Abitazioni notte (22-7)	Fabbriche
VIB-MO-005	61.3	53.5	89.8	23.3	32.6	38.6	77	74	89
VIB-MO-020	47.8	50.7	48.7	41.4	41.4	44.9	77	74	89
VIB-MO-070	45.7	50.6	66.3	39.8	45.5	46.7	77	74	89
VIB-MO-040	58.3	59.2	67.8	48.8	51.8	54.1	77	74	89
VIB-MO-050	60.9	66.5	76.4	59.2	56.7	60.8	77	74	89
VIB-MO-030	48.1	48.5	44.1	41.0	42.2	43.2	77	74	89
VIB-MO-060	51.8	51.4	50.1	40.1	42.6	45.3	77	74	89
VIB-VE-010	41.3	42.6	57.8	28.5	42.6	41.5	77	74	89

Tabella 2-2 Sintesi valutazione del disturbo sulle persone (UNI 9614)

Dall'analisi dei picchi di velocità registrati durante il periodo di registrazione sono state identificate le sorgenti maggiormente significative per ciascun recettore in esame. In particolare gli eventi in corrispondenza dei quali sono stati registrati i massimi valori di picco giornalieri riguardano le attività svolte durante l'installazione della strumentazione e le attività correlate all'utilizzo del locale da parte degli inquilini. Su alcuni ricettori tuttavia è risultata apprezzabile e diffusa anche la componente legata al traffico stradale sulla S.P. 58 (VIB-MO-020, VIB-MO-040, VIB-MO-050).

In ogni caso i valori di picco registrati sono notevolmente inferiori ai valori di riferimento ai sensi della UNI 9916, per cui il clima vibrazionale allo stato attuale non comporta effetti che possano arrecare danni alla struttura.

Anche in termini di disturbo alle persone i livelli di accelerazione misurati sono inferiori ai valori di soglia e in generale anche inferiori alla soglia di sensibilità umana (71 dB), salvo casi specifici connessi tuttavia non a sorgenti esterne all'edificio bensì alle normali attività svolte all'interno.

## 2.4. CARATTERIZZAZIONE GEOLITOLOGICA

Dal punto di vista geologico, la galleria Verduno, ricade in un ambito caratterizzato da sedimenti marini appartenenti al Bacino Terziario Ligure – Piemontese, a costituire il substrato locale e dalla presenza discontinua di coperture, generalmente di ridotto spessore, costituite dai depositi quaternari.

Il substrato è costituito da sequenze litologiche di età compresa tra il Tortoniano ed il Miocene, che comprendono la formazione di base delle Marne di Sant'Agata Fossili, per lo più a composizione marnoso – argillosa, con disposizione a monoclinale regolare, ben stratificata, immersione verso NW ed inclinazione di  $10^{\circ}$ ÷ $15^{\circ}$ , cui sono sovrapposti i terreni della serie evaporitica composta da gessi ed evaporiti.

I terreni di copertura, relativi al periodo che va dal Quaternario all'Attuale, sono riferibili fondamentalmente ai depositi detritici colluviali del versante nord occidentale di Verduno. La loro composizione granulometrica è variabile, da grossolana (sabbie, ghiaie e ciottoli) a fine (limi e argille), con presenza di gessi sia in forma di cristalli dispersi in una matrice limo-sabbiosa, sia di vere e proprie arenarie gessose.

Di seguito si riporta la successione stratigrafica dell'area interessata dall'opera a progetto, (cfr. Profili geologico – geotecnici della Canna di Monte e della Canna di Valle), a partire dalle unità più antiche, stratigraficamente inferiori:

- **Marne di Sant'Agata Fossili (*Tortoniano*) - Unità 7**

Complesso di argille, argilliti e marne fino a litoidi, coerenti, di colore grigio-azzurro spesso a frattura irregolarmente concoide, cui localmente si intercalano livelli di peliti siltose grigie e corpi arenacei e conglomeratici. Rappresenta una fase di sedimentazione di mare aperto, come indicato anche dalle associazioni fossili presenti. L'assetto giaciturale è, nel settore di Verduno, monoclinale, debolmente inclinato ( $5^{\circ}$  ÷  $20^{\circ}$ ) verso N-NW. Lo spessore complessivo raggiunge i 250÷300 m.

- **Formazione gessoso-solfifera (*Messiniano*) - Unità 6**

La formazione poggia, tramite una superficie di tipo erosivo, direttamente sulle Marne di Sant'Agata Fossili. La formazione è presente, in destra orografica al Tanaro, sulla zona collinare a Nord ed a Ovest di Verduno. Dal punto di vista litologico comprende un'alternanza di peliti grigie, violacee o brune ed arenarie fini in strati sottili, entro la quale si intercalano corpi a giacitura lentiforme, di gesso in grossi cristalli o a grana minuta (arenarie gessose). Questi sedimenti presentano in generale scarso addensamento e anche per la presenza di

fenomeni di dissoluzione dei gessi, un'elevata percentuale di vuoti e/o vere e proprie cavità di tipo carsico. Lo spessore di questi terreni è molto variabile, date le caratteristiche di sedimentazione e di evoluzione successiva. Nel tratto in esame risulta generalmente di alcune decine di metri, mentre la potenza massima riscontrata raggiunge il centinaio di metri.

- **Depositi colluviali (*Olocene - attuale*) - Unità 4**

Si tratta di terreni sciolti a granulometria prevalentemente fine, provenienti dal rimaneggiamento e da un limitato trasporto ad opera delle acque di scorrimento superficiale, dei prodotti di alterazione in posto del substrato e dei materiali dei corpi di frana. Si tratta di limi sabbiosi fini non addensati, limi argillosi poco consistenti inglobanti, a tratti, sabbie e ghiaie. Sono presenti localmente frammenti di cristalli di gessi e, raramente, ciottoli ( $d_{max} = 10\div 20$  cm) e clasti di marna alterata. La distribuzione degli accumuli relativi a questa unità è controllata dal comportamento nei confronti dell'erosione areale dei terreni affioranti (granulometria, presenza di coesione, posizione morfologica favorevole all'erosione, ...). I depositi principali, a granulometria limoso - argillosa (con spessori anche dell'ordine della decina di metri), si rinvengono alla base dei versanti impostati nelle sequenze marnose profondamente modellate dai fenomeni fluviali, come la dorsale di Roddi e le incisioni minori confluenti nella Valle del torrente Talloria.

Considerando i valori di NSPT misurati nei sondaggi geognostici si evince che i terreni interessati dalle opere appartengono alla categoria C del suolo di fondazione definite dal D.M. 14 gennaio 2008.

**SUOLO C:** Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero  $15 < NSPT,30 < 50$  nei terreni a grana grossa e  $70 < c_{u,30} < 250$  kPa nei terreni a grana fine).

## 2.5. DEFINIZIONE DELLE CLASSI DI SENSIBILITA'

La definizione delle classi di sensibilità alle vibrazioni dei ricettori presenti fa riferimento alle classi stabilibili sulla base della mera destinazione d'uso dell'immobile in conformità con la Norma UNI 9614, a prescindere quindi da considerazioni locali quali ad esempio lo stato di conservazione, la tipologia costruttiva dell'immobile, ecc. e così definite:



- Sensibilità Molto Alta: Aree critiche (ospedali, case di cura, laboratori, .....)
- Sensibilità Alta: Edifici residenziali o assimilabili, Luoghi di culto, Scuole
- Sensibilità Media: Uffici, Locali commerciali
- Sensibilità Bassa: Edifici industriali, altri edifici in assenza di fruizione umana significativa (box, tettoie, bassi fabbricati, magazzini, ecc.)

In relazione alle suddette definizioni di scale di sensibilità, il territorio si colloca in una scala da molto alta a bassa.

E' infatti prevista un'area di realizzazione del Nuovo Ospedale di Alba – Bra (cod. VE307), collocato ad una distanza pari a circa 250 m dal tracciato in galleria e a 500 m dall'imbocco della galleria del lotto 2.6 lato Asti, ricettore pertanto di *Sensibilità Molto Alta*.

La maggior parte dei ricettori presenti lungo il tracciato in progetto in galleria è residenziale, quindi a *Sensibilità Alta*, mentre gli edifici a *Bassa Sensibilità* prevalgono in prossimità dell'imbocco lato Asti così come poi nella tratta all'aperto in direzione dello svincolo di Verduno-Roddi.

### 3. QUADRO DI RIFERIMENTO PREVISIONALE

#### 3.1. CARATTERISTICHE DEL FENOMENO FISICO

Il potenziale di impatto delle suddette attività sui ricettori, inteso come immissione negli edifici di vibrazioni e di rumore trasmesso per via solida, è sostanzialmente determinato dalla geometria sorgente-ricettore, dal mezzo geolitologico e dalle caratteristiche strutturali dell'edificio.

Si distinguono tre principali tipi di onde che trasportano energia vibrazionale [G.A. Athanasopoulos, P.C. Pelekis, G.A. Anagnostopoulos – “Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurements” - Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19 (2000) 277– 288]:

- Onde di compressione (onda P)
- Onde di taglio (onda S)
- Onde di superficie (orizzontali, onde R, e verticali, onde L)

I primi due tipi sono onde di volume (“body-waves”), mentre le onde di superficie, come dice il nome, si propagano sull'interfaccia fra due strati con diverse proprietà meccaniche, principalmente quindi sulla superficie di separazione fra terreno ed aria.

La Figura 3-1 mostra schematicamente la modalità di propagazione dei diversi tipi di onde vibrazionali ed evidenzia che la velocità di propagazione dei diversi tipi non è la stessa: le onde di compressione (onde P) sono le più veloci, mentre le onde di taglio (S) e di superficie (R) viaggiano con velocità più basse, in dipendenza del valore del modulo di Poisson del terreno.

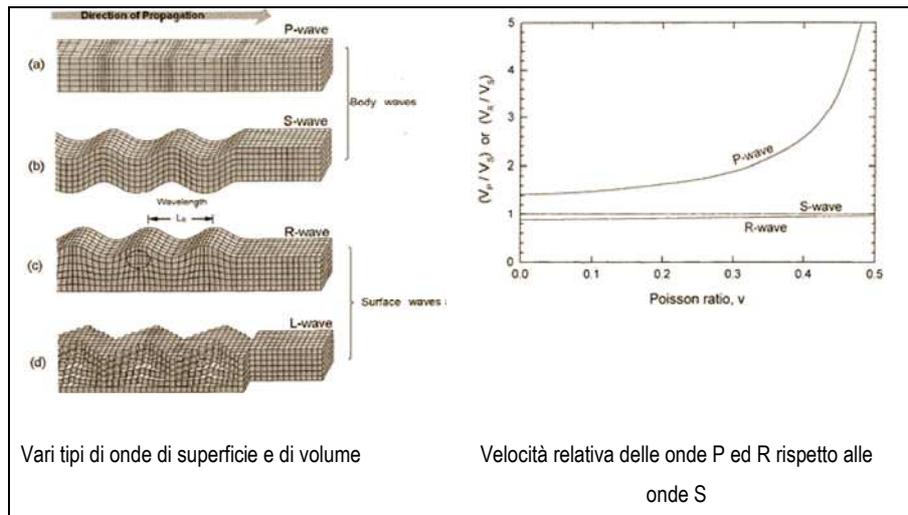


Figura 3-1 Caratteristiche di propagazione delle onde vibrazionali

### 3.1.1. Propagazione delle vibrazioni tra sorgente e ricettore

Il modello di propagazione impiegato, valido per tutti i tipi di onde, si basa sull'equazione di Bornitz (Richart Jr. FE, Hall Jr. JR, Woods RD. Vibrations of soils and foundations. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1970):

$$w_2 = w_1 \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^n e^{-a(r_2 - r_1)}$$

dove:

$w_1$  e  $w_2$  sono le ampiezze della vibrazione alle distanze  $r_1$  e  $r_2$  dalla sorgente,  $n$  è il coefficiente di attenuazione geometrica e dipende dal tipo di onda e di sorgente,  $a$  è il coefficiente di attenuazione del materiale e dipende dal tipo di terreno.

L'equazione tiene conto dei meccanismi di attenuazione geometrica e di dissipazione che l'onda vibrazionale subisce propagandosi nel terreno:

- attenuazione per dissipazione interna del terreno;
- attenuazione geometrica, in relazione al tipo di sorgente e di onda;
- attenuazione dovuta a ostacoli o discontinuità del terreno;

- attenuazione dovuta all'accoppiamento terreno-fondazione;
- attenuazione dovuta alla propagazione in direzione verticale nel corpo dell'edificio;
- amplificazione determinata dai solai.

### 3.1.1.1. Attenuazione geometrica del terreno

L'attenuazione geometrica è espressa dal termine  $w_2 = w_1 \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^n$ ; la sua applicazione implica che sia nota l'ampiezza della vibrazione  $w_1$  alla distanza  $r_1$  e sia definita la localizzazione e il tipo di sorgente (sorgente puntuale o lineare, in superficie o in profondità) e il tipo di onda vibrazionale (di volume o di superficie).

Nella Figura 3-2 vengono riportati i valori che il coefficiente di attenuazione geometrica assume in funzione del tipo di sorgente e di onda (Kim D-S, Lee J-S. Source and attenuation characteristics of various ground vibrations. In: Dakoulas P, Yegian M, Holtz B, editors. Geotechnical earthquake engineering and soil dynamics III. ASCE. Geotechnical Special Publication No. 75, 1998;2: 1507-17).

Values of attenuation coefficient due to radiation damping for various combinations of source location and type (from Ref. [9])

Source location	Source type	Induced wave	$n$
Surface	Point	Body wave	2.0
		Surface wave	0.5
	Infinite line	Body wave	1
		Surface wave	0
In-depth	Point	Body wave	1.0
	Infinite line		0.5

Figura 3-2 Valori del coefficiente di attenuazione geometrica

Considerando che, con riferimento all'ottenimento dei livelli massimi, si deve sempre prendere in considerazione una sorgente concentrata, si ha che l'esponente  $n$  vale 0.5 per le onde di superficie (predominanti in caso di sorgente posta in superficie), e 1 per le onde di volume (predominanti in caso di sorgente profonda, come nel caso di fondazione su pali).

### 3.1.1.2. Attenuazione dovuta all'assorbimento del terreno

E' espresso dal termine esponenziale dell'equazione di Bornitz e rappresenta i fenomeni di dissipazione di energia meccanica in calore.

Il coefficiente di attenuazione del materiale  $a$  dipende dal tipo di terreno e cresce linearmente con la frequenza. Ciò fa sì che le alte frequenze si estinguano dopo un breve percorso, mentre le frequenze più basse si propagano a distanze maggiori.

Valori del coefficiente  $a$  sono stati riportati da Woods e Jedele per quattro classi di terreno e per due bande di frequenza [Woods RD, Jedele LP. Energy-attenuation from construction vibrations. In: Gazetas G, Selig ET, editors. Vibration problems in geotechnical engineering. Special Publication of ASCE, 1985:229-46]. Si veda a proposito la Figura 3-3.

Values of frequency dependent attenuation coefficient,  $a$ , for four classes of soil materials (from Ref. [19]).

Class	Material damping coefficient $a$ ( $m^{-1}$ )		Description of material
	5 Hz	50 Hz	
I	0.01–0.03	0.1–0.3	Weak or soft soils ( $N_{SPT} < 5$ )
II	0.003–0.01	0.03–0.1	Competent soils ( $5 < N_{SPT} < 15$ )
III	0.0003–0.003	0.003–0.03	Hard soils ( $15 < N_{SPT} < 50$ )
IV	< 0.0003	< 0.003	Hard, competent rock ( $N_{SPT} > 50$ )

Figura 3-3 Valori del coefficiente di attenuazione del terreno

Yang ha proposto tuttavia l'uso di un coefficiente di attenuazione dell'energia indipendente  $a_0$  dalla frequenza, correlato al coefficiente  $a_0$  dall'espressione:

$$a_0 = a/f \quad (f \text{ frequenza della vibrazione}).$$

Valori del coefficiente  $a_0$  proposti da Yang per quattro tipi di terreno sono riassunti nella Figura 3-4 [Yang XJ. Evaluation of made-man ground vibrations. In: Prakash, S, editor. Proceedings of the Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, vol. III. St. Louis, MO, 1995. P. 1435-8].

Values of the frequency-independent attenuation coefficient,  $a_0$ , for various soil groups (from Ref. [22])

Soil group		$a_0$ (s/m)
Rocks (covering layer within 1.5–2.0 m)	Shale, limestone	$(0.385-0.485)10^{-3}$
	Sandstone	$(0.580-0.775)10^{-3}$
Hard plastic clays		$(0.385-0.525)10^{-3}$
Broke stones of medium density cobbles		$(0.850-1.100)10^{-3}$
Plastic clays, Coarse sands and gravels of medium density		$(0.965-1.200)10^{-3}$
Soft plastic clays, Silts, Slightly dense, Medium or coarse sands		$(1.255-1.450)10^{-3}$
Silty clays, Silts and saturated fine sands		$(1.200-1.300)10^{-3}$
Recently deposited clays and unsaturated loose sands		$(1.800-2.050)10^{-3}$

*Figura 3-4 Valori del coefficiente di attenuazione del terreno indipendenti dalla frequenza*

Il coefficiente di attenuazione  $a$  può essere stimato anche attraverso l'equazione:  $a = \frac{2\pi \cdot f \cdot \eta}{c}$

dove  $\eta$  è il fattore di perdita del terreno,  $c$  è la velocità di propagazione in m/s,  $f$  è la frequenza di Hz.

Il rapporto  $\eta/c$  dipende dal particolare tipo di terreno considerato ed assume valori elevati nel caso di terreno coltivato soffice, mentre assume valori molto modesti nel caso di pavimentazioni rigide in CLS.

Per quanto riguarda la valutazione delle velocità di propagazione delle onde nel terreno ( $V_P$ ,  $V_S$  e  $V_R$ ) si può far riferimento alle seguenti relazioni:

Velocità di propagazione delle onde di compressione nel terreno:

$$V_P = \sqrt{\frac{E_d \times (1 - \nu_d)}{\rho \times (1 + \nu_d) \times (1 - 2 \times \nu_d)}}$$

Velocità di propagazione delle onde di taglio nel terreno:

$$V_S = \sqrt{\frac{G_d}{\rho}}$$

Velocità di propagazione delle onde di superficie nel terreno:

$$V_R \cong 0,90 \times \sqrt{\frac{G_d}{\rho}}$$

Ove:

- Ed Modulo elastico normale dinamico in N/m<sup>2</sup>.
- Gd Modulo elastico tangenziale dinamico in N/m<sup>2</sup>.
- vd Coefficiente di contrazione o di Poisson dinamico.
- $\rho$  Massa di volume del terreno (densità) in kg/m<sup>3</sup>.

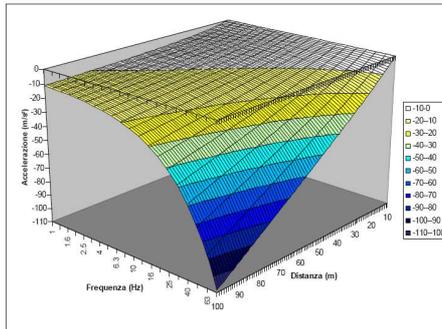
La velocità di propagazione delle onde orientativamente può assumere valori dell'ordine di:

- $V_P = 1.500$  m/s per le onde di compressione in argilla
- $V_P = 800$  m/s per le onde di compressione in terreno sciolto sedimentario
- $V_P = 500$  m/s per le onde di compressione in sabbie e limi
- $V_P = 1.800$  m/s per le onde di compressione in tufi
- $V_P = 1.500$  m/s per le onde di compressione in gessi
- $V_S = 150$  m/s per le onde di taglio in argilla
- $V_S = 260$  m/s per le onde di taglio in terreno sciolto sedimentario
- $V_S = 150$  m/s per le onde di taglio in sabbie e limi
- $V_S = 600$  m/s per le onde di taglio in tufi

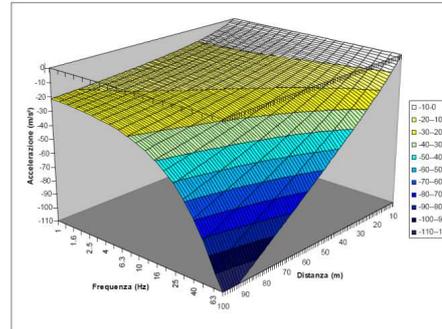
I valori tipici di densità e fattore di perdita, noti esclusivamente per alcune classi geologiche e in presenza di un ammasso omogeneo, sono riassunti in Figura 3-5.

TIPO DI TERRENO	DENSITA' [t/m <sup>3</sup> ]	FATTORE PERDITA $\eta$
Roccia compatta	2.65	0.01
Sabbia, limo, ghiaia, loess	1.6	0.1
Argilla, terreni argillosi	1.7	0.2÷0.5
Molasse	2.25	0.05
Scisti cristallini	2.25	0.05
Depositi alluvionali	1.83	0.05
Calcarei evaporitici	2.25	0.05

Figura 3-5 Parametri del terreno



Attenuazione in funzione della frequenza e della distanza per onde superficiali



Attenuazione in funzione della frequenza e della distanza per onde di volume

Figura 3-6 Andamento delle funzioni di attenuazione

### 3.1.1.3. Attenuazione dovuta alle discontinuità del terreno

Con riferimento alla propagazione di onde superficiali non si considera il caso di terreni stratificati, o della presenza di disomogeneità di vario genere che possono ostacolare o favorire la propagazione delle vibrazioni. A rigore infatti, potrebbe essere necessario valutare anche l'attenuazione dovuta alla presenza di discontinuità nel terreno, per cui una quota di energia viene riflessa dalle superfici di discontinuità e non viene percepita al di là di esse.

In particolare, se l'eccitazione avviene al di sotto dello strato superficiale sovraconsolidato, l'interfaccia fra esso ed il terreno incoerente sottostante riduce l'ampiezza delle vibrazioni che riescono ad attraversare tale interfaccia.

L'attenuazione dovuta alle discontinuità del terreno può essere 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:

$$A_i = 20 \cdot \log(F_r)$$

$$F_r = \left[ \frac{1 + d_c \cdot c_c / d_a \cdot c_a}{2} \right]$$

dove:

$F_r$  è il fattore di attenuazione per riflessione;

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

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

Fr è sempre minore di 1 ed è legato al rapporto fra le impedenze dei due strati (l'impedenza è data dal prodotto fra la velocità di propagazione delle onde di taglio e la densità del materiale).

### 3.1.2. Propagazione nelle strutture edilizie

La propagazione delle vibrazioni negli edifici 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 di zero dB 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 gli abitanti sia per le 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 multipiano un valore di attenuazione delle vibrazioni da piano a piano è approssimativamente pari a 3 dB. I risultati di misure sperimentali svolti da 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.

### 3.1.2.1. Accoppiamento terreno-edificio

La differenza tra il livello di vibrazione del terreno e quello delle strutture di fondazione è detta attenuazione per perdita di accoppiamento (coupling loss).

Dal punto di vista fondazionale, gli edifici possono essere classificati come edifici su fondazione diretta (plinti isolati o travi continue) ed edifici su fondazioni profonde (pali, pozzi, diaframmi, ecc).

La Figura 3-7 fornisce i 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 gli edifici con struttura portante verticale in muratura, in relazione alla maggiore massa, viene messa in conto una maggiore attenuazione pari a 2 dB. Per edifici con struttura portante verticale in acciaio, in relazione alla minore massa in gioco, viene messa in conto una riduzione di attenuazione, rispetto al caso di struttura portante in cemento armato, pari a 2 dB.

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.

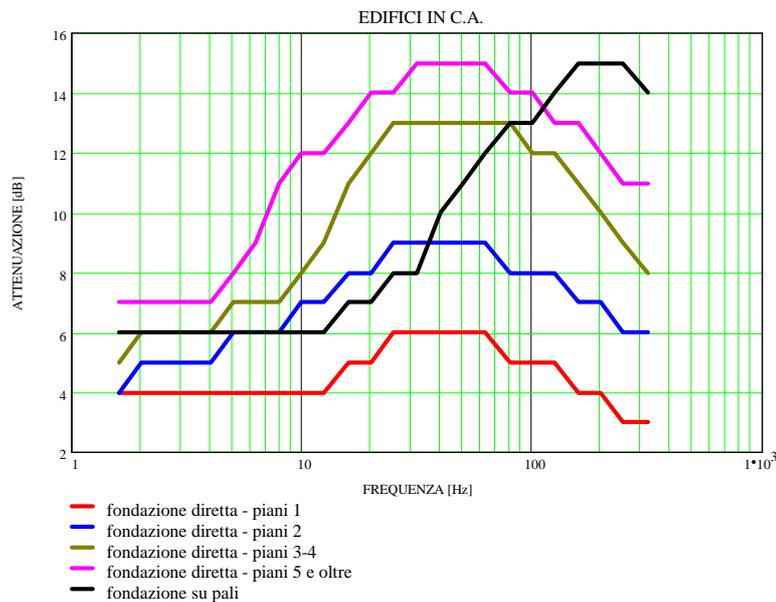


Figura 3-7 Spettri di attenuazione [dB] per differenti sistemi fondazionali

### 3.1.2.2. Attenuazione interpiano all'interno degli edifici

Le caratteristiche strutturali degli edifici che influiscono sulla propagazione delle vibrazioni trasmesse dal terreno alla fondazione vengono considerate composte da due componenti:

- propagazione da piano a piano;
- amplificazione degli orizzontamenti.

I due fenomeni comportano evidentemente due effetti contrari, il primo di attenuazione, il secondo di amplificazione. In relazione alle condizioni specifiche che caratterizzano gli immobili, uno dei due effetti può prevalere sull'altro, come pure i due effetti si possono elidere vicendevolmente.

In generale i fenomeni si differenziano in relazione al campo di frequenza in cui hanno specifica rilevanza.

#### Propagazione delle vibrazioni da piano a piano

Le vibrazioni, prevalentemente verticali in corrispondenza del sistema fondazionale dell'edificio, si propagano verso l'alto con una attenuazione progressiva da piano a piano. Tale attenuazione è fornita in Figura 3-8 in funzione della frequenza per altezze di interpiano sino a 3.2 m e per 3 orizzontamenti.

Il primo orizzontamento connota la posizione di minima attenuazione che viene considerata nelle verifiche previsionali.

DISTANZE [m] / LIVELLO EQ. DI ACCELERAZIONE $a_w$	SPETTRO DI ATTENUAZIONE PER PROPAGAZIONE DA PIANO A PIANO (RE 10-6 M/S2) [dB]														
	FREQUENZA C..B. 1/3 OTTAVA [HZ]														
	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315
1° ORIZZONTAMENTO	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3			
2° ORIZZONTAMENTO	-4	-4	-4	-4	-5	-5	-5	-5.5	-6	-6	-6	-6			
3° ORIZZONTAMENTO	-6	-6	-6	-6	-7	-7	-7	-7	-7.5	-8	-9	-9			

*Figura 3-8 Spettri di attenuazione [dB] per propagazione da piano a piano*

### Amplificazione sui solai all'interno degli edifici

Per ciò che riguarda la propagazione delle vibrazioni nel corpo della struttura i problemi maggiori riguardano i solai: la vibrazione può essere amplificata in corrispondenza della frequenza fondamentale degli orizzontamenti, che dipende dalla luce del solaio e dalla loro tipologia costruttiva.

L'amplificazione dei solai spazia in un ambito che va da 5 dB per frequenze proprie di circa 20 Hz a valori limite di 20 dB per frequenze proprie di circa 40 Hz. Le frequenze proprie degli orizzontamenti più diffusi si situano tra 10 Hz e 20 Hz.

Per le frequenze orizzontali, come già citato, la norma DIN 4150 suggerisce di calcolare le frequenze proprie ai vari piani con la formula  $f_{propria} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$  dove n è il numero del piano.

Per le frequenze connesse a modi verticali, la frequenza propria di un solaio si può esprimere come:

$$f_{propria} = \sqrt{k/m}$$

dove "k" viene assunto approssimativamente come la rigidezza per carichi concentrati in mezzeria ed "m" come la massa della striscia di solaio considerata (il calcolo preciso proviene dalla risoluzione di un integrale di Duhamel).

Aggiungendo l'ipotesi di sezione del solaio rettangolare e sostituendo i valori si trova:

$$f_{propria} = \text{cost} \cdot \sqrt{r} \cdot \sqrt{(E/T) \cdot h/L^2}$$

essendo r un coefficiente che assume valori compresi tra 48 per solai semplicemente appoggiati e 192 per solai perfettamente incastrati, E il modulo di

elasticità del materiale,  $h$  lo spessore del solaio,  $\Gamma$  il peso specifico del materiale,  $L$  la luce del solaio.

In Figura 3-9 sono riportati – a titolo esemplificativo – gli spettri di amplificazione attesi per orizzontamenti in latero-cemento di classico dimensionamento per differenti luci. Le curve tabellate fornite dalla letteratura indicano che non sono attese amplificazioni per le componenti in frequenza superiori a 50 Hz.

Nel caso di struttura portante orizzontale in acciaio e legno, sono messe in conto, in relazione ai minori smorzamenti strutturali che caratterizzano tali materiali costruttivi, maggiori amplificazioni, dell'ordine del 10 % e del 20 % rispettivamente per acciaio e legno.

luce del solaio	SPETTRO DI amplificazione degli orizzontamenti (re 10-6 m/s <sup>2</sup> ) [db]														
	Frequenza c..b. 1/3 ottava [Hz]														
	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315
luce da 4 m	1.5	2.6	4.4	8.4	20	4.1									
luce da 5 m	4.3	8.7	20	4.8											
luce da 6 m	20	3.7													
luce da 7 m	4.8														

*Figura 3-9 Spettri di amplificazione [dB] degli orizzontamenti*

### 3.1.2.3. Livelli di vibrazione per la valutazione del disturbo alle persone

Per i livelli di vibrazione al fine di valutare il disturbo alle persone, è necessario effettuare il calcolo del valore efficace complessivo ponderato in termini di accelerazione, nel campo 1 ÷ 80 Hz delle bande a terzi di ottava, in accordo alla UNI 9614.

A partire dallo spettro di vibrazione in accelerazione così calcolato, si calcola quindi il valore efficace globale dell'accelerazione attraverso la messa in conto di tutte le componenti spettrali (radice quadrata della somma dei quadrati delle singole componenti) e considerando la curva di ponderazione per postura variabile o non nota (UNI 9614).

### 3.1.2.4. 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 ovviamente 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.

Studi basati su considerazioni teoriche e soprattutto su rilievi in sito 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:

$L_p$ : livello di pressione sonora in dB (0 dB = 20  $\mu$ Pa)

$L_a$ : livello di vibrazione di accelerazione all'orizzontamento in dB (0 dB = 1  $\mu$ g)

f: frequenza per bande a terzi di ottava in Hz

La norma NT ACOU 033, che definisce i criteri di misura in laboratorio dell'efficienza di radiazione di un divisorio, riporta una formula approssimata analoga a quella precedentemente indicata:  $L_p = L_a - 20 \cdot \log(f) + 17,2$

A partire dallo spettro relativo ai livelli di rumore solido così calcolato, si calcola quindi il valore efficace della pressione sonora attraverso la messa in conto di tutte le componenti spettrali (radice quadrata della somma dei quadrati delle singole componenti) e considerando la curva di ponderazione A.

Le relazioni forniscono valori attesi che vanno interpretati tenendo presente la natura delle formulazioni stessi, che ovviamente non possono tenere conto delle specifiche caratteristiche di ogni distinto locale (alfa di sabine medio, la presenza di finestrate di notevole ampiezza, ecc.).

Inoltre occorre considerare che la presenza di componenti vibratorie particolarmente basse (10-30 Hz) potrebbe introdurre anche altre sorgenti di rumore connesse con fenomeni di micro-urti tra oggetti nel locale quali stoviglie e suppellettili non particolarmente stabili.

Da ultimo si sottolinea che le relazioni precedenti si riferiscono ai livelli sonori indotti negli edifici come effetto delle vibrazioni originate dalla sorgente considerata. Pertanto i livelli acustici globali rilevabili all'interno degli edifici, che

sono ovviamente influenzati da altre sorgenti di rumore, possono differire significativamente dai valori stimati.

*Il livello di rumore solido è da confrontare con il rumore di fondo minimo presente nell'edificio per valutare il differenziale tra tali livelli sonori.*

### 3.2. ANALISI DEGLI IMPATTI

L'analisi degli impatti nel seguito sviluppata e documentata riguarda il tratto di galleria, composto da due canne, poste a una distanza minima di 40 metri, aventi mediamente uno sviluppo pari a circa 3 km. Le coperture di terreno, calcolate rispetto alla quota di progetto della galleria, variano mediamente tra i 50 e i 75 m, con un massimo di circa 100 m nel tratto centrale dell'opera in sotterraneo; la galleria sarà realizzata con metodo meccanizzato mediante l'impiego di una TBM-EPB.

Il tratto in galleria attraversa l'area collinare su cui si sviluppano il borgo abitato "Garassini" e altri edifici isolati in località "Montemiglietto" e "Cogni".

Operando con una TBM si è ritenuto di prevedere la realizzazione di un cunicolo esplorativo provvisorio di appoggio allo scavo meccanizzato, da eseguire in tradizionale con mezzi meccanici (martellone o fresa puntuale) in anticipo rispetto alla partenza della TBM, dal quale eseguire le indagini e gli eventuali interventi.

L'analisi considera pertanto anche lo scavo del cunicolo in relazione all'impiego del martellone, a carico emissivo superiore rispetto ad una fresa puntuale.

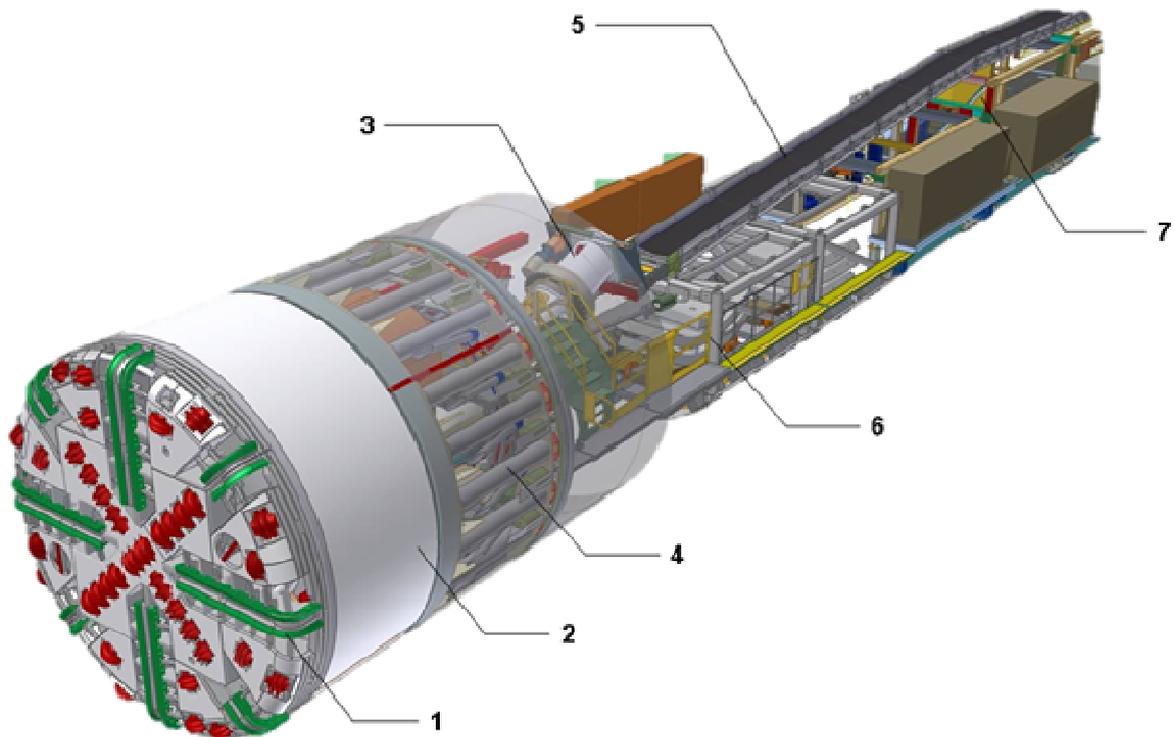
#### 3.2.1. Lo scavo con TBM

TBM, acronimo di Tunnel Boring Machine, è il nome di un sistema di attrezzature speciali con il quale si opera una meccanizzazione completa delle operazioni di scavo e di rivestimento delle gallerie: ciò consente di avere un approccio costruttivo "industriale" che garantisce elevati livelli di sicurezza e produttività, unitamente al minimo impatto in superficie sia in termini di opere civili che in termini di inquinamento vibro-acustico. Con questa tecnologia si può lavorare in vari tipi di terreno o roccia ed operare con un livello di sicurezza accettabile anche sotto falda.

Una generica TBM (Figura 3-10) è sostanzialmente costituita da:

- una parte anteriore scudata (shield), sulla quale sono posizionati la testa rotante con gli utensili di scavo, il sistema di estrazione dello smarino, un sistema di montaggio conci e sensori vari.

- una parte posteriore (back-up) che corre su un binario di servizio e contiene una serie di impianti e servizi necessari al funzionamento della macchina stessa;
- un sistema per lo smaltimento dello smarino in superficie (normalmente un nastro trasportatore).



*Figura 3-10 Schema generale di una TBM*

Il principio che regola il funzionamento di una TBM a pressione di terra bilanciata (EPB) consiste nel contrastare la spinta del fronte di scavo mediante la reazione idrostatica esercitata dal terreno scavato stesso. Allentato dal fronte mediante gli utensili montati sulla testa fresante, il terreno va a riempire la camera di pressione, azionata dai cilindri di spinta, e ne riceve la pressione sufficiente per supportare il fronte di scavo. Il terreno viene poi estratto in maniera controllata dalla camera di pressione mediante una coclea e successivamente allontanato fino all'area di stoccaggio provvisorio ubicata nel cantiere stazione mediante nastro trasportatore.

Le macchine EPB più recenti possono avanzare con due diverse modalità, a fronte chiuso e a fronte aperto. La modalità a fronte chiuso consiste nel riempire completamente la camera anteriore utilizzando il terreno scavato per

controbilanciare la pressione del fronte e regimentare l'ingresso delle acque in galleria. L'avanzamento a fronte aperto consiste invece nel procedere con la camera di pressione solo parzialmente riempita di materiale e dunque non viene messa in pressione: questo è un vantaggio dal punto di vista della velocità di avanzamento ma è praticabile solo in rocce stabili ed in assenza di infiltrazioni d'acqua.

Con l'avanzamento a fronte chiuso è possibile esercitare una pressione continua e modulabile al fronte minimizzando l'impatto, in termini tensionali, sull'ammasso circostante. Tale risultato è raggiungibile anche grazie all'immediata posa in opera dei conci di rivestimento in prossimità del fronte di scavo. I conci sono elementi prefabbricati in calcestruzzo, eventualmente fibrorinforzati, che vengono assemblati nella zona posteriore dello scudo e, una volta montati, oltre a diventare elementi di rivestimento definitivo forniscono contrasto ai cilindri di spinta per il ciclo produttivo successivo.

In modalità a fronte chiuso, il controllo della pressione del terreno nella camera di pressione è fondamentale per ottenere un avanzamento ottimale e si esercita agendo su diversi parametri di scavo, tra cui principalmente velocità di avanzamento e condizionamento del terreno. La velocità di avanzamento si regola agendo sulla spinta dei cilindri e sulle velocità di rotazione della testa e della coclea. L'iniezione di schiume e polimeri nel terreno serve a ridurre la permeabilità e a renderlo plastico e lavorabile, al fine di evitare collassi del fronte, minimizzare l'usura degli utensili di taglio e delle parti rotanti e conseguentemente ottimizzare le operazioni di manutenzione. Altrettanto importante è verificare che il volume dello smarino sia sempre uguale al volume teorico di scavo, per prevenire detensionamenti al fronte che potrebbero generare pericolosi collassi in superficie (cosiddetti "fornelli").

Per definire lo spettro sorgente della TBM che verrà utilizzata negli scavi delle gallerie della linea metropolitana sono stati utilizzati i dati rilevati nel corso di indagini sperimentali svolte nell'ambito del PMA dei lavori di costruzione di gallerie a Torino (metropolitana Linea 1) e Bologna (Nodo AV).

### Caso studio Torino

La galleria di Torino è stata realizzata con una macchina EPB del diametro di 7750 mm, ad una profondità media (nella tratta considerata) di circa 13 metri dal piano di campagna ed attraverso formazioni ghiaiose e sabbiose con gradi di addensamento e cementazione eterogenei.

I dati di accelerazione sono stati rilevati con accelerometri Wilcoxon 799LF associati ad un convertitore A/D NI USB-9233 (frequenza di campionamento di 2000 Hz e filtro passa-basso a 300 Hz). I dati registrati sono stati elaborati con analisi spettrale in bande di 1/3 ottava da 1 a 80 Hz, per ottenere i livelli delle accelerazioni e, per integrazione del segnale, le velocità di picco. Il contenuto in frequenza del segnale ha mostrato un andamento generalmente costante ed il

funzionamento della TBM è risultato particolarmente evidente nel campo delle frequenze da 20 a 40 Hz. Tra le componenti della sollecitazione, la più importante è risultata sempre generalmente quella verticale, seguita da quella longitudinale (parallela all'asse scavo) ed infine quella trasversale. Il rapporto segnale-rumore si è mantenuto costantemente su valori superiori a 10 dB.

Lo spettro utilizzato quale sorgente è stato ricavato per regressione numerica dai valori di accelerazione rilevati in superficie, in particolare i livelli medi degli spettri per bande in terzi di ottava integrati su una costante di tempo di 2,5 s.

Come già illustrato nei capitoli precedenti, per calcolare l'attenuazione geometrica e materiale si è impiegato il modello di Kim e Lee , la cui equazione di base è:

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

in cui  $\eta$  è il fattore di perdita del terreno,  $d$  la distanza in metri dalla sorgente,  $d_0$  la distanza di riferimento a cui è nota l'accelerazione  $a_0$ ,  $f$  la frequenza e  $c$  la velocità delle onde P. Come ipotesi iniziale, si è considerata la sorgente come puntuale e collocata in profondità. Per il fattore di perdita  $\eta$  si è tenuto conto dei valori proposti da Ungar e Bender è stato assunto il valore di 0,05. Non è stato considerato il caso di terreni stratificati, né la presenza di disomogeneità di vario genere che possono ostacolare o favorire la propagazione delle vibrazioni.

Il modello, con queste ipotesi di base, si è dimostrato sufficientemente in grado di approssimare la risposta del terreno in termini di attenuazione, in modo efficace fino a distanze di 30 metri. Di fatto, questa legge di propagazione mostra una più rapida attenuazione con la distanza. La Figura 3-11 riporta un confronto tra uno spettro in superficie misurato ed uno calcolato applicando la relazione sopracitata.

La Figura 3-12 riporta due registrazioni "tipo", espresse tramite diagrammi di frequenza/velocità di vibrazione sulle 24 ore di misura, in cui sono indicati i valori della distanza tra la progressiva del fronte di scavo a fine giornata e quella di installazione del vibrometro (stimata approssimativamente sulla base della posizione dell'edificio rispetto al tracciato del tunnel) e dalla velocità media giornaliera della fresa TBM nella data della misura. L'analisi delle oltre 850'000 acquisizioni vibrometriche effettuate durante lo scavo della galleria di linea non ha posto in evidenza alcuna correlazione tra le vibrazioni registrate sugli edifici ed il passaggio della fresa TBM. Dall'osservazione delle misure giornaliere si evince inoltre come i valori di picco delle velocità di vibrazione siano generalmente inferiori alle soglie di rischio più cautelative previste dalla normativa vigente.

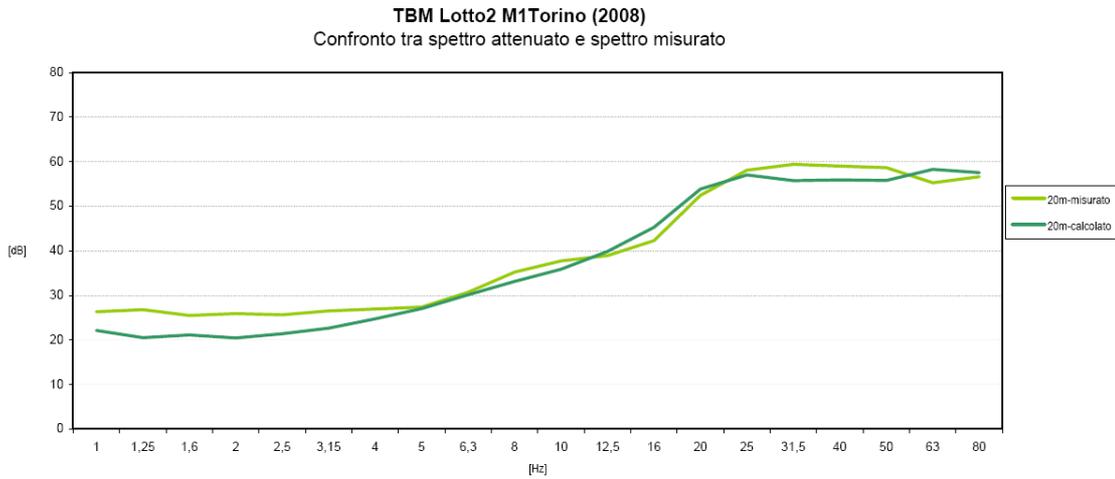


Figura 3-11 Confronto spettro misurato-attenuato mediante l'equazione Kim e Lee

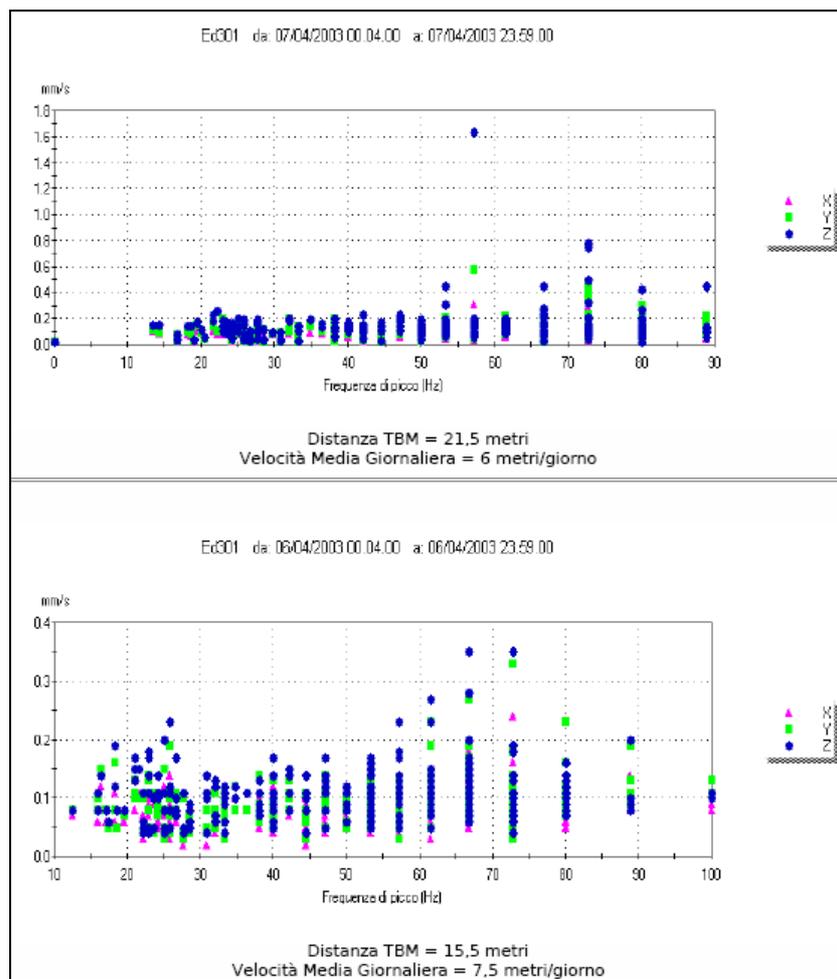


Figura 3-12 Registros "tipo" espresse tramite diagrammi di frequenza/velocità di vibrazione sulle 24 ore di misura, in relazione con l'avanzamento del fronte di scavo

Specifiche misure hanno inoltre riguardato un edificio a 3 piani interrati sottopassato dalla linea metropolitana e in particolare il 3° solaio interrato a - 5 m circa dal tetto dello scavo della TBM svolto con fresca scudata caratterizzata da rotazioni della fresa di 2 giri al minuto (0,033 Hz). Le misure sono state svolte con vibrofono triassiale ed hanno riguardato la fase di avvicinamento e di allontanamento della TBM all'edificio.

L'analisi dei rilievi (Figura 3-13) ha evidenziato che:

- la componente verticale di velocità  $V_z$  (massimo 0,2 mm/s) è minore delle componenti orizzontale  $V_x$  e  $V_y$  (massimo 0,3 mm/s);
- le velocità di picco sono 200 volte inferiori a tutte le frequenze indicate dalla DIN 4150 come valori limite per le strutture più delicate.
- le velocità massima di vibrazione diminuiscono in funzione della distanza dal fronte di scavo secondo leggi di decadimento relativamente semplici.

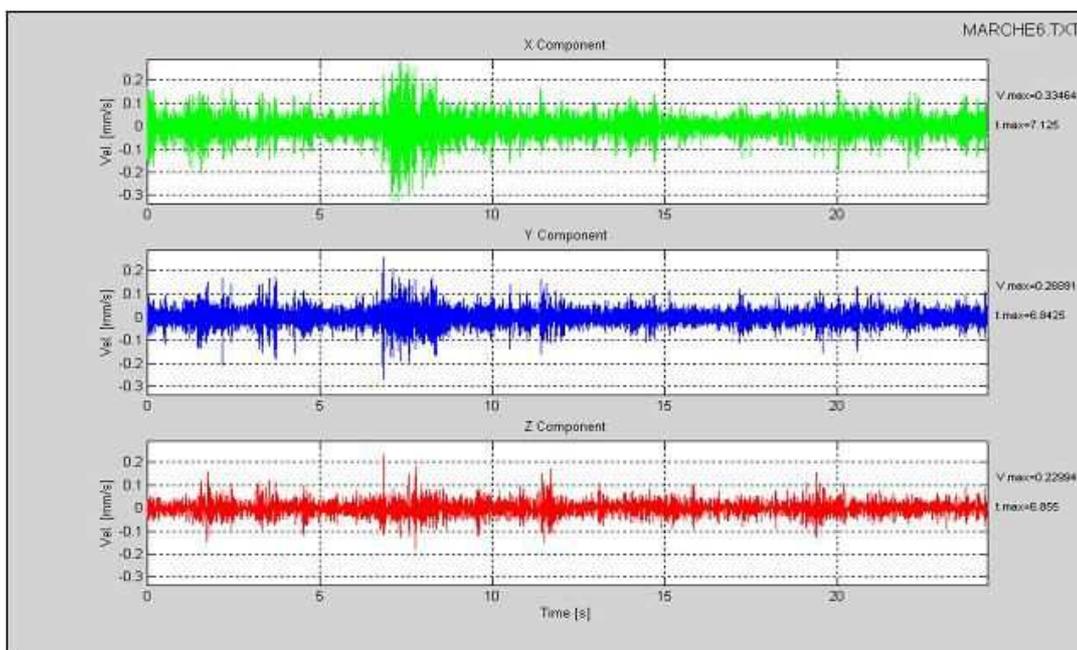


Figura 3-13 Risultati analisi dei rilievi per la realizzazione della metropolitana di Torino durante le fasi di avvicinamento e allontanamento della TBM dall'edificio

### Caso studio Bologna

Lo scavo della gallerie a foro cieco con TBM ha riguardato la realizzazione del passante ferroviario AV di Bologna. Nell'ambito del piano di monitoraggio ambientale che ha accompagnato la realizzazione dell'opera sono state svolte nel corso del 2005 specifiche misure di vibrazioni in corrispondenza di 8 ricettori interessati dal fronte avanzamento lavori.

La Figura 3-14 riporta gli spettri dei livelli di accelerazione in corrispondenza dei ricettori, a distanze comprese tra 9-35 m dal fronte di scavo. I livelli complessivi ponderati sono risultati inferiori sia al limite previsto per posture non note per le aree critiche (71 dB) sia per le abitazioni nel periodo notturno (74 dB).

La Figura 3-15 invece documenta gli spettri dei livelli di accelerazione all'emissione determinati per regressione dalle misure di campo.

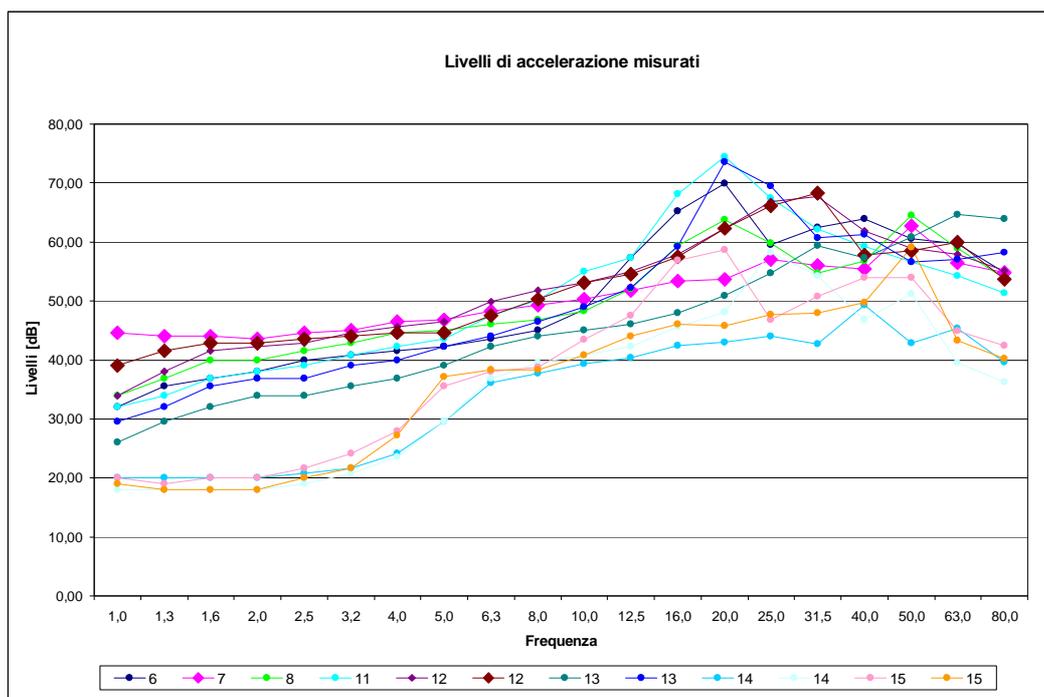


Figura 3-14 Spettro livelli di accelerazione misurati in corrispondenza dei ricettori (dB)

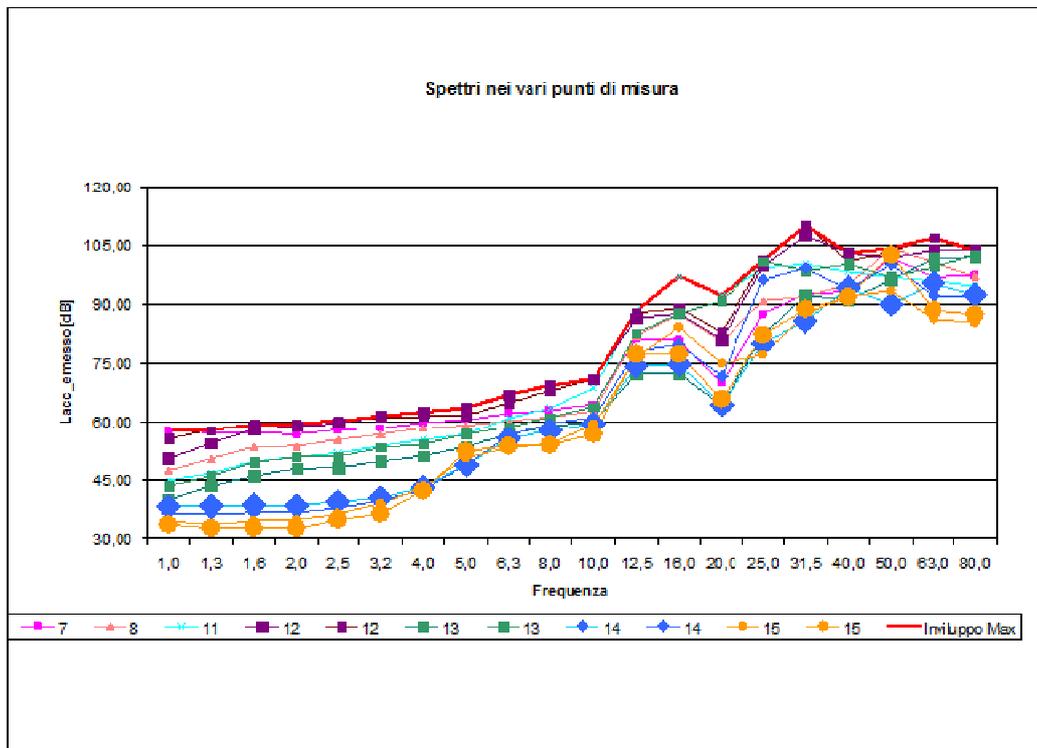


Figura 3-15 Spettro dei livelli di emissione in dB a 5 m

### 3.2.2. Lo scavo con martellone

Per gli scavi con martellone ci sono un'imponente quantità di dati sperimentali; tutte le misure si riferiscono al vettore velocità delle particelle ottenute durante lo scavo di gallerie mediante abbattimento con demolitori idraulici di classe elevata quindi con energia per colpo di 6 – 8 kJ. I valori riassunti nel diagramma (Figura 3-16) sono indicati l'insieme dei vettori velocità più elevati, ottenuti nelle misure, a parità di distanza; per chiarezza del diagramma sono stati, infatti, esclusi quelli medi e minori.

La dispersione dei dati segue quella classica dei demolitori, aumentata dalla variabilità, sia pur contenuta, dell'energia per colpo e dalla differenza delle formazioni rocciose. Le campagne, infatti, sono state eseguite durante lo scavo di gallerie in differenti formazioni rocciose.

Variabilità dei valori registrati a parità di distanza

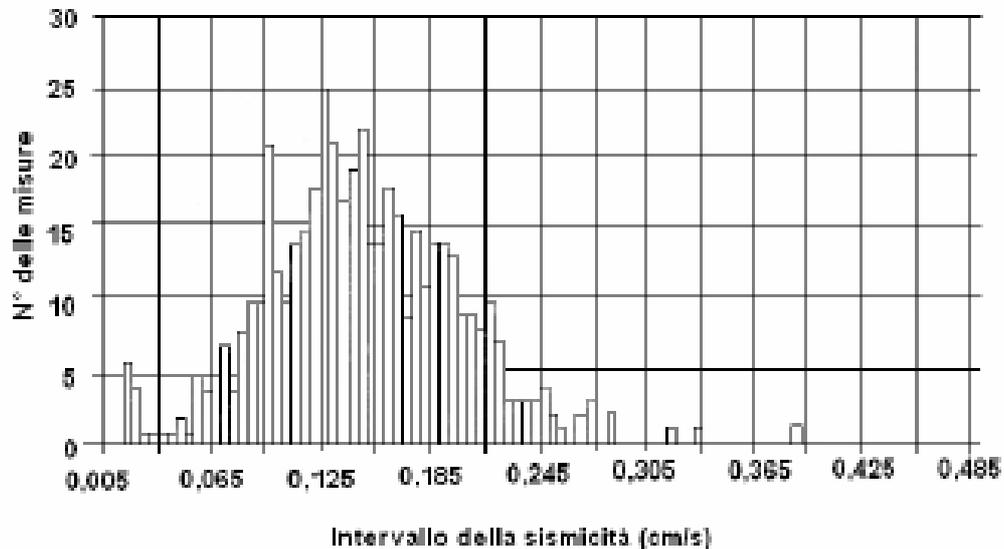


Figura 3-16 Andamento del vettore velocità delle particelle in funzione del tempo (Dantini, 2002)

Occorre anche rilevare che durante le misure non è stato possibile associare la sismicità alla posizione del demolitore sul fronte, pertanto, per maggiore precisione, occorre aggiungere ai fattori che influenzano la dispersione dei dati anche la distanza percorsa dal sisma. In tutti i casi, le relazioni utilizzabili in pratica sono le seguenti, valide rispettivamente, con le solite approssimazioni, per una stima con affidabilità al 95% e per l'involuppo di tutte le misure.

$$v = 150 \cdot d^{-1,58}$$

$$v = 250 \cdot d^{-1,58}$$

Le relazioni precedenti possono essere scalate con la radice quadrata dell'energia media per colpo (7 kJ) ottenendo:

$$v = 32 \cdot d^{-1,58}$$

$$v = 54 \cdot d^{-1,58}$$

dove v è il vettore velocità (cm/s) e d è la distanza (m).



Per mezzo delle due espressioni è possibile evidentemente valutare, in assenza di misure dirette, l'ampiezza delle vibrazioni da attendersi in funzione delle distanze e dell'energia per colpo del demolitore usato, con le stesse avvertenze sottolineate nel caso di scavi superficiali.

Per quanto riguarda le frequenze fondamentali dell'onda sismica, che costituiscono un importante parametro assunto nelle norme più recenti, è da notare che sperimentalmente esse sono variabili tra 50 Hz e 200 Hz.

### 3.2.3. Stime dei livelli vibrazionali

#### 3.2.3.1. Galleria Verduno

Le misure sperimentali relative ai due casi studio precedentemente documentati hanno evidenziato il basso impatto in termini di disturbo vibrazionale a carico dei ricettori interessati dallo scavo con TBM.

L'esperienza di monitoraggio su lavori di costruzione simili non ha in effetti constatato alcun effetto significativo lungo gallerie scavate con TBM anche a distanze di 20-25 m dal fronte di scavo. I soggetti più sensibili avvertono occasionalmente, in periodo notturno, un debole innalzamento di livello alle basse frequenze.

Al fine di dare evidenza del basso impatto in termini di disturbo alle persone associato alla modalità di scavo con TBM nel contesto dell'ambito di studio interessato dai lavori di scavo della Galleria Verduno, sugli stessi ricettori oggetto di verifiche previsionali puntuali nello studio andato in DEC-VIA, sono state eseguite nuove verifiche previsionali sulla base del modello di propagazione descritto e della geolitologia attraversata e della nuova sezione di scavo.

Nella Tabella 3-1 sono riportati gli edifici oggetto di verifica, con riferimento al codice attribuito in sede di censimento acustico svolto nell'ambito del PD/PE (*elaborato 2.6E-rF.1.1.02-00*) e, tra parentesi, al codice attribuito nell'elaborato *2.6E-dD.2.1.26-00 "Planimetria edifici censiti"* (annesso alla verifica di assoggettabilità), ciascuno associato alla destinazione d'uso, alla progressiva chilometrica, alla tipologia costruttiva, alla distanza planimetrica dalla calotta ed infine al livello di accelerazione ponderato UNI 9614N (postura non nota) in dB.

I valori previsionali stimati in corrispondenza dei ricettori sono anche contenuti nelle schede dell'Allegato 1, nel quale vengono riportati gli spettri dei livelli di accelerazione in dB asse Z tra 1 Hz e 80 Hz e i livelli complessivi di accelerazione a partire dall'emissione vibrazionale di riferimento, fino al livello stimato all'interno dell'edificio a valle delle diverse componenti di attenuazione e

amplificazione. Viene inoltre riportato il livello di rumore solido trasmesso dalle strutture.

Si evidenzia che i livelli di accelerazione pesati secondo la UNI 9614 sono sensibilmente inferiori al limite di 74 dB valido per posture non note nel periodo notturno per ricettori residenziali e assimilabili quali gli edifici scolastici (per i quali si considera il limite diurno di 77 dB), i reparti di degenza ospedaliera, ecc.

Il ricettore VE009 è un edificio commerciale/magazzino, per cui il livello stimato va confrontato con il limite di 89 dB.

Alla luce delle valutazioni effettuate, pertanto, anche sul ricettore ad Alta Sensibilità rappresentato dall'area di realizzazione del Nuovo Ospedale di Alba – Bra (cod. VE307), ad una distanza di gran lunga superiore rispetto a quella dei ricettori sovrastanti la galleria (250 m dal tracciato della galleria), si escludono criticità sia in termini di disturbo alle persone che di interferenza con eventuali apparecchiature sensibili.

Infine, per quanto riguarda la componente di rumore solido trasmessa dalle strutture, dalle schede riportate nell'Allegato 1 si evidenziano in generale livelli inferiori al valore limite di 25 dBA in ambiente abitativo nel periodo notturno, previsto dal DPCM 14.11.97 per l'applicabilità del criterio differenziale.

<b>Punto</b>	<b>Km</b>	<b>Destinazione d'uso</b>	<b>Tipologia fondazioni/ Tipologia strutturale</b>	<b>N° piani</b>	<b>Distanza calotta [m]</b>	<b>L<sub>w</sub> UNI9614N [dB]</b>
MO037 (002)	1+217	Residenziale	Dirette/C.A.	2	46	66.0
MO028 (009-010)	1+460	Residenziale	Dirette/C.A.	1	54	68.0
MO035a (024)	1+563	Residenziale	Dirette/C.A.	2	63	63.0
MO035b (022)	1+577	Residenziale	Dirette/C.A.	2	63	63.0
MO035c (020)	1+600	Residenziale	Dirette/C.A.	2	66	62.0
MO035d (021)	1+628	Residenziale	Dirette/C.A.	2	65	63.0
MO035e (023)	1+610	Residenziale	Dirette/C.A.	2	64	63.0
MO035f (025)	1+590	Residenziale	Dirette/C.A.	2	73	61.0
MO026b (011)	1+508	Residenziale	Dirette/C.A.	2	59	64.0
MO001 (028-030)	1+940	Residenziale	Dirette/MURATURA	2	88	57.0
MO002 (029)	1+940	Magazzino	Dirette/MURATURA	2	88	57.0
MO003 (029)	1+940	Magazzino	Dirette/MURATURA	2	88	57.0
MO006 (031)	1+940	Magazzino	Dirette/MURATURA	1	88	57.0
VE010 (034)	3+200	Residenziale	Dirette/MURATURA	1	49	64.0
VE009 (036)	3+640	Commerciale	Dirette/C.A.	1	34	64.0

Tabella 3-1 Impatti TBM

### 3.2.3.2. Cunicolo esplorativo

In relazione allo scavo del cunicolo esplorativo mediante martellone, sulla base delle formule documentate in precedenza, sono state calcolate le curve di decadimento dei valori di velocità massima in funzione della distanza dal fronte di scavo. Le curve sono visualizzate in Figura 3-17 insieme al valore limite ammissibile di 5 mm/s per edifici residenziali e simili, ai sensi della DIN4150.

Le due curve definiscono un range di variazione della velocità massima di vibrazione.

Inoltre nella figura è stato riportato l'esito della stima sul ricettore più vicino al cunicolo (MO037), sito in realtà a valle dello stesso ad una distanza minima di 53 m dal fronte finale di scavo.

Su questo ricettore si stimano velocità di vibrazione massima dell'ordine di 0.5-1 mm/s, pertanto nettamente inferiori al limite di 5 mm/s.

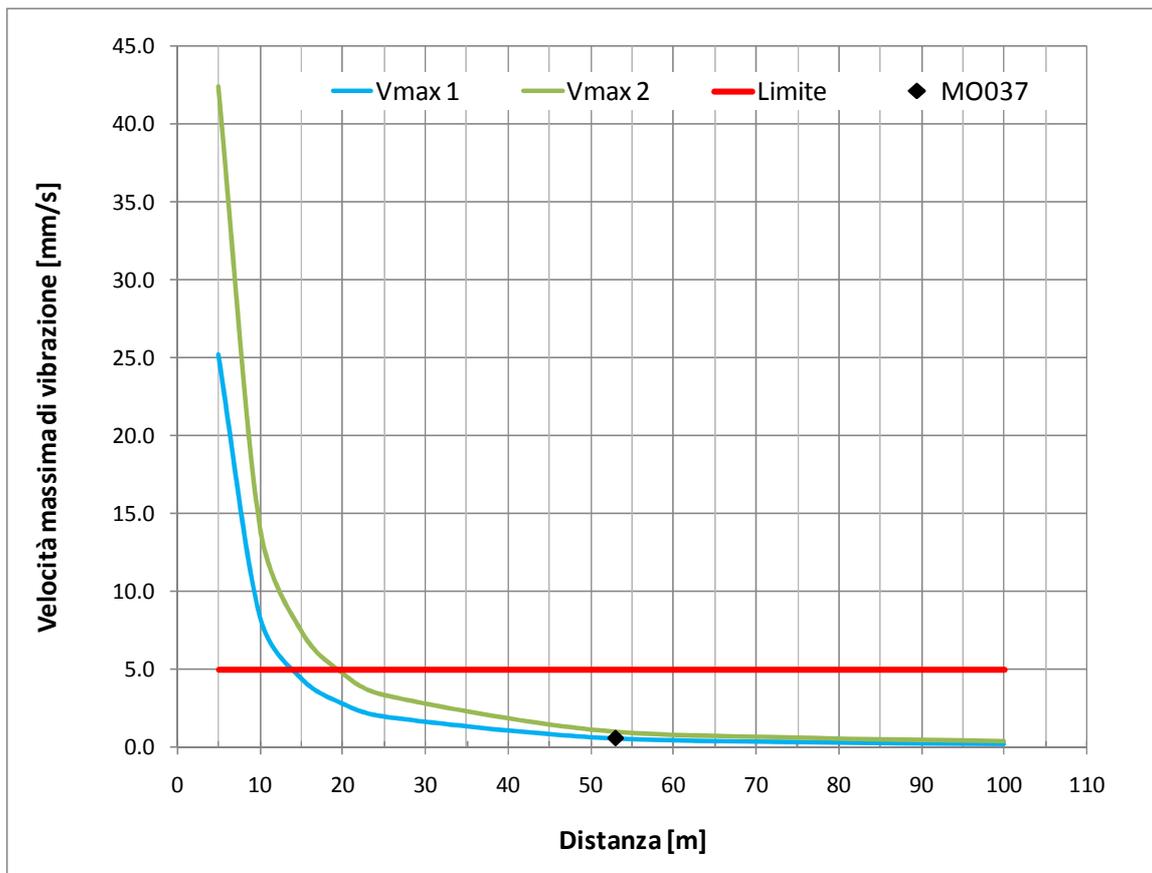


Figura 3-17 Andamento della velocità massima di vibrazione in funzione della distanza dal fronte di scavo

Per quanto riguarda invece la valutazione del disturbo prodotto dalle vibrazioni sul corpo umano, si è fatto riferimento al grafico in Figura 3-18 predisposto da Goldman nel 1948 e che mette in relazione la velocità massima di vibrazione e la frequenza.

All'interno del grafico vi è evidenziata una retta rossa in corrispondenza della velocità massima di 5 mm/s che garantisce che, nel range di frequenza che va da 0 a 21 Hz, si è in un campo in cui si va verso sensazioni spiacevoli, ma non si attraversa la soglia dell'intollerabile.

Nel caso specifico del ricettore MO037 in corrispondenza del valore di velocità stimato di 1 mm/s siamo pertanto al più nel range della percettibilità. In corrispondenza infatti di un valore di velocità stimato di 0.5 mm/s, la curva della percettibilità non viene intersecata.

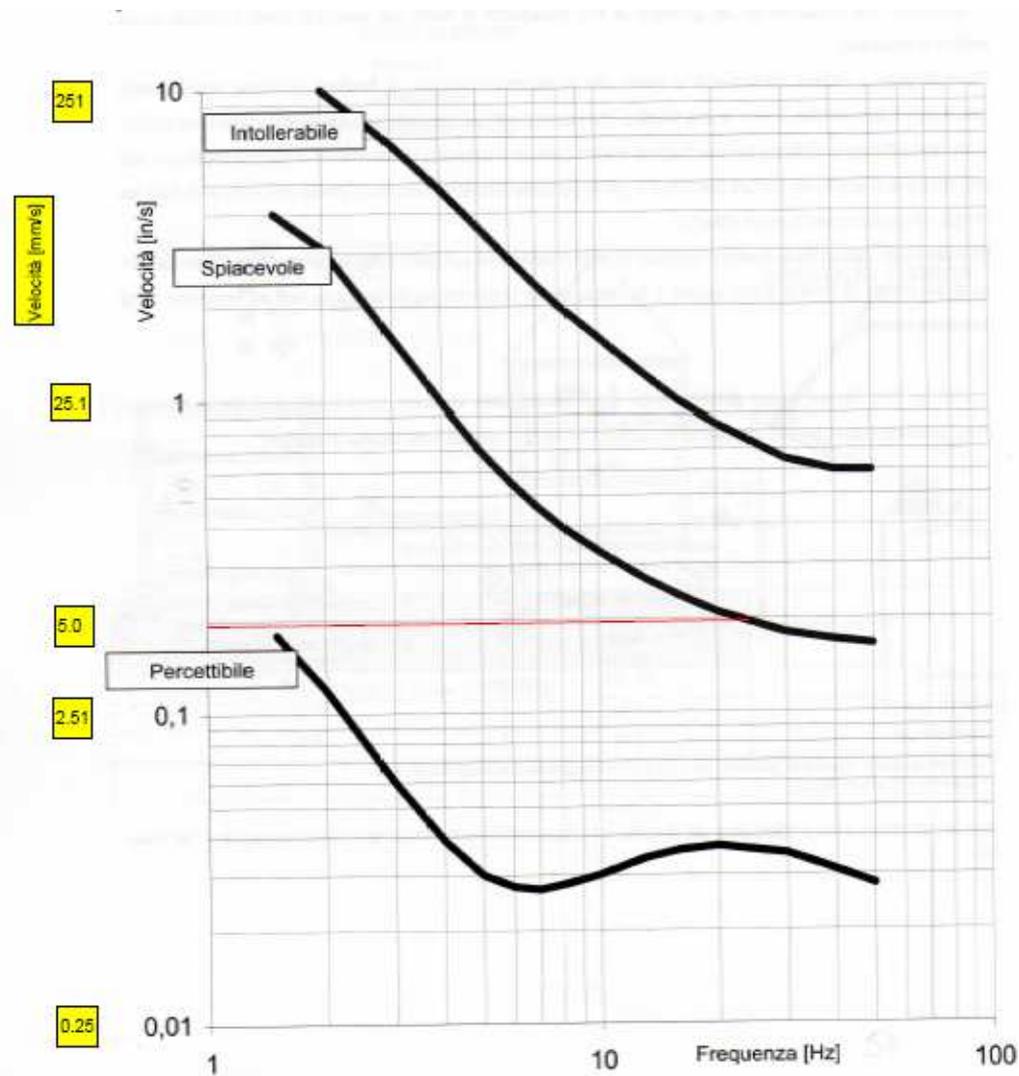


Figura 3-18 Disturbo prodotto dalle vibrazioni – Risposta soggettiva del corpo umano ad un moto vibratorio-modello (Goldman, 1948)

### 3.3. VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI

Per la stima degli impatti si è fatto ricorso alla stessa metodologia utilizzata nel SIA che tiene conto dei seguenti attributi da associare ai fattori di pressione riconosciuti come potenzialmente interagenti sulla componente:

- **Magnitudo potenziale (M):** è la misura o la dimensione massima dell'alterazione dello stato della componente attesa come conseguenza dell'azione di un determinato fattore di pressione indotto dagli interventi di progetto sul territorio;
- **Probabilità (P):** è la probabilità stimata associata all'evento che produce un determinato fattore di pressione;
- **Reversibilità (R):** esprime il tempo necessario al recupero ed al ripristino delle condizioni ante operam da parte del sistema ambientale.

In particolare è stato definito il seguente fattore di pressione denominato *VIC*: *Alterazione del clima vibrazionale in fase di scavo*.

I livelli di *Magnitudo* (M) sono stati espressi nel modo seguente:

- *Livello I:* livelli di accelerazione complessivi ponderati in frequenza inferiori alla soglia di sensibilità umana (71 dB);
- *Livello II:* livelli di accelerazione complessivi ponderati in frequenza superiori alla soglia di sensibilità umana (71 dB) ma oggettivamente non disturbanti per la popolazione residente esposta (inferiori a 74 dB);
- *Livello III:* livelli di accelerazione complessivi ponderati in frequenza oggettivamente disturbanti per la popolazione residente esposta (superiori a 74 dB).

La Probabilità (P) associata all'evento "alterazione del clima vibrazionale in fase di scavo" è reputata ALTA.

La persistenza dell'effetto della pressione ambientale - *Reversibilità* (R) - è, per la fase di costruzione fatta corrispondere alla durata relativa del disturbo associato. Per tale ragione il giudizio di reversibilità è stato assunto pari a BT – reversibile a breve termine.

Nella seguente tabella vengono riportati gli esiti della stima degli impatti a seguito dell'applicazione del metodologia descritta, per gli ambiti territoriali individuati.



<b>Ambito territoriale - ricettore</b>	<b>M</b>	<b>P</b>	<b>R</b>	<b>Sensibilità</b>	<b>Impatto</b>
1 - MO037 – residenziale	I	A	BT	Alta	Medio
2 - Borgata Garassini (MO028, MO035a-b-c-d-e-f, MO026) - residenziali	I	A	BT	Alta	Medio
3 - MO001 Bricco dei Cogni- residenziale	I	A	BT	Alta	Medio
4 - VE010	I	A	BT	Alta	Medio
5 - Ospedale Alba - VE307	I	A	BT	Molto Alta	Medio
6 - VE009	I	A	BT	Bassa	Trascurabile

Tabella 3-2 Presentazione degli esiti della valutazione

Ai suddetti giudizi corrispondono le seguenti definizioni.

**Impatto Medio:** Impatto che non costituisce normalmente un elemento rilevante del processo decisionale ma richiede, in ogni caso, il controllo e la verifica delle stime effettuate (Progetto di Monitoraggio Ambientale).

**Impatto Trascurabile:** Gli effetti prodotti ricadono all'interno del livello di percezione e dei margini di errore intrinseci alla stima dell'alterazione.

In tutti gli ambiti territoriali identificati, l'impatto stimato è "medio", a meno del ricettore commerciale per cui, data la bassa sensibilità, l'impatto è valutato trascurabile. Nel caso dell'Ospedale di Alba, ricettore VE307, l'impatto risulta "medio" in relazione esclusivamente alla Sensibilità Molto Alta del ricettore.

## 4. CONCLUSIONI

La verifica dei livelli di vibrazione svolta in occasione del SIA del Progetto Definitivo aveva considerato esclusivamente gli effetti di danno agli edifici potenzialmente causati dallo scavo con esplosivi della Galleria Verduno. Lo studio aveva definito quali erano le cariche massime di esplosivo che potevano garantire velocità massime di vibrazioni pari a 5 mm/s alle quali, in termini di disturbo, corrispondono sensazioni spiacevoli senza tuttavia superare la soglia dell'intollerabilità.

Il passaggio da una tecnica di scavo in tradizionale con esplosivo ad una tecnica di scavo meccanizzato con TBM-EPB determina sostanziali benefici e riduzioni dell'impatto vibrazionale, sia rispetto al disturbo sia al potenziale danno agli edifici prossimi al fronte di scavo.

Nel primo caso infatti il disturbo per le persone (e il danno agli edifici) è inevitabilmente legato alla detonazione della carica di esplosivo necessaria all'avanzamento i cui effetti, anche se mitigabili, possono causare spavento e panico tra i residenti.

Nel secondo caso, invece, le numerose esperienze di monitoraggio in casi analoghi di gallerie scavate con TBM hanno sempre dimostrato l'assenza di situazioni di impatto problematiche, anche a distanze di 20-25 m dal fronte di scavo.

La stima dei livelli di vibrazione, finalizzata alla valutazione del disturbo per le persone all'interno degli edifici in conseguenza delle attività di scavo della Galleria Verduno con metodo meccanizzato mediante l'impiego di una TBM-EPB e del cunicolo esplorativo, hanno sempre documentato livelli di accelerazione inferiori alla soglia di sensibilità umana (71 dB).

La combinazione della *Magnitudo* del fattore di pressione relativo all'alterazione del clima vibrazionale con la sensibilità degli ambiti territoriali, la *Probabilità* e *Reversibilità* dell'azione di pressione, ha portato in generale alla identificazione di impatti medi, che diventano trascurabili in prossimità dell'imbocco lato Asti della Galleria Verduno a causa della bassa sensibilità dei ricettori (zona industriale). Le stime di impatto attribuiscono un livello "medio" anche al ricettore ospedaliero, sebbene molto distante dal fronte di scavo, in conseguenza della Sensibilità Molto Alta assegnata all'edificio.



**Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco Il Lotto 6 Roddi – Diga Enel  
VERIFICA DI ASSOGGETTABILITA' EX ART. 20 D.LGS. 152/06  
VIBRAZIONI - Analisi ambientale opere in variante**

## **ALLEGATO 1**

### **VERIFICHE PREVISIONALI**

PUNTO	Localizzazione	Dest. d'uso	TIPOLOGIA	IMPATTO	Distanza calotta	Llim
MO037	Fraz. Rivalta 62, La Morra (CN)	Residenziale	C.A.	TBM	46 m	74 dB

Edificio di civile abitazione con struttura portante in c.a., fondazioni dirette su plinti in muratura, solai in latero-cemento, a 2 piani fuori terra risultato in costruzione in sede di censimento, sito alla progressiva chilometrica Km 1+217, ad una distanza planimetrica dall'autostrada di 14 m e altimetrica di 49 m.



Impatto in costruzione (TBM) - Livelli di accelerazione e rumore solido  
 Livello massimo



PUNTO	Localizzazione	Dest. d'uso	TIPOLOGIA	IMPATTO	Distanza calotta	Llim
MO028	Borgata Garassini 61, La Morra (CN)	Residenziale	C.A.	TBM	54 m	74 dB

Edificio di civile abitazione con struttura portante in c.a., fondazioni dirette in c.a., solai in latero-cemento, a 1 piano fuori terra, sito alla progressiva chilometrica Km 1+460, ad una distanza planimetrica dall'autostrada di 1 m e altimetrica di 61 m.



Impatto in costruzione (TBM) - Livelli di accelerazione e rumore solido  
 Livello massimo

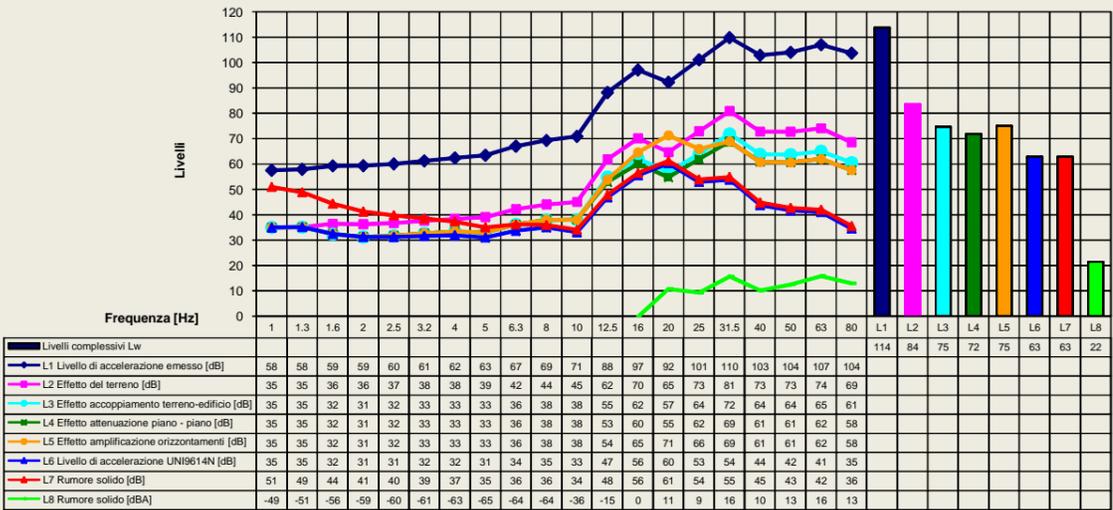


PUNTO	Localizzazione	Dest. d'uso	TIPOLOGIA	IMPATTO	Distanza calotta	Llim
MO035a	Borgata Garassini 64, La Morra (CN)	Residenziale	C.A.	TBM	63 m	74 dB

Edificio di civile abitazione con struttura portante in c.a., fondazioni dirette su plinti in c.a., solai in c.a., a 2 piani fuori terra, sito alla progressiva chilometrica Km 1+563, ad una distanza planimetrica dall'autostrada di 20 m e altimetrica di 72 m.



Impatto in costruzione (TBM) - Livelli di accelerazione e rumore solido  
 Livello massimo

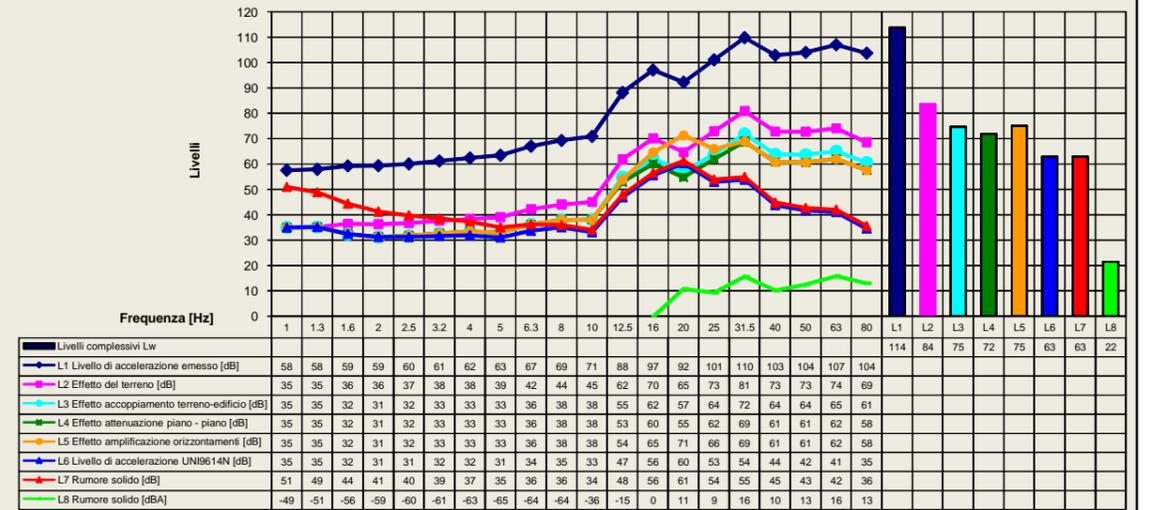


PUNTO	Localizzazione	Dest. d'uso	TIPOLOGIA	IMPATTO	Distanza calotta	Llim
MO035b	Borgata Garassini 64a, La Morra (CN)	Residenziale	C.A.	TBM	63 m	74 dB

Edificio di civile abitazione con struttura portante in c.a., fondazioni dirette su plinti in c.a., solai in c.a. a 2 piani fuori terra, sito alla progressiva chilometrica Km 1+577, ad una distanza planimetrica dall'autostrada di 0 m e altimetrica di 72 m.



Impatto in costruzione (TBM) - Livelli di accelerazione e rumore solido  
 Livello massimo

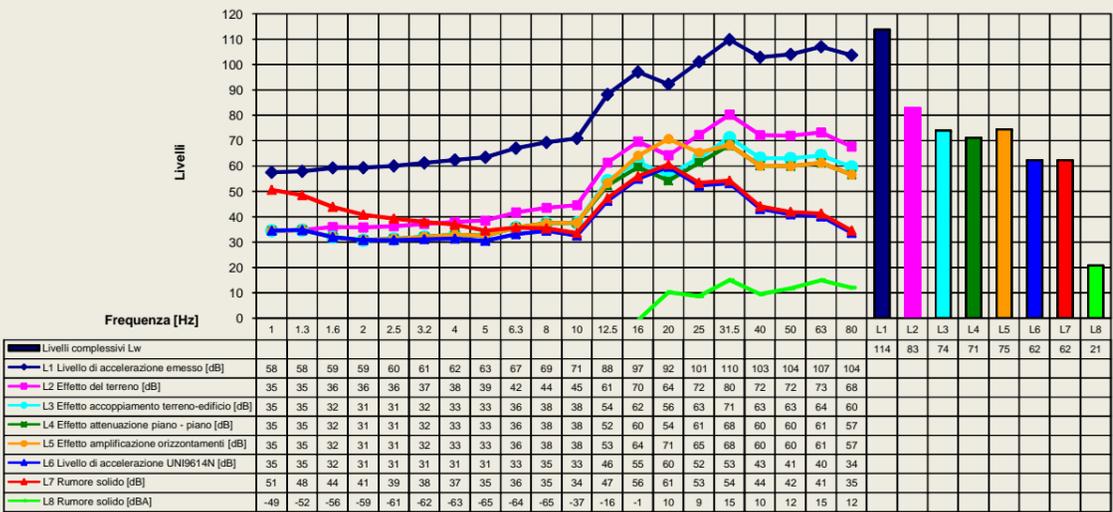


PUNTO	Localizzazione	Dest. d'uso	TIPOLOGIA	IMPATTO	Distanza calotta	Llim
MO035c	Borgata Garassini 64b, La Morra (CN)	Residenziale	C.A.	TBM	66 m	74 dB

Edificio di civile abitazione con struttura portante in c.a., fondazioni dirette su plinti in c.a., solai in c.a., a 2 piani fuori terra, sito alla progressiva chilometrica Km 1+600, ad una distanza planimetrica dall'autostrada di 23 m e altimetrica di 72 m.



Impatto in costruzione (TBM) - Livelli di accelerazione e rumore solido  
 Livello massimo

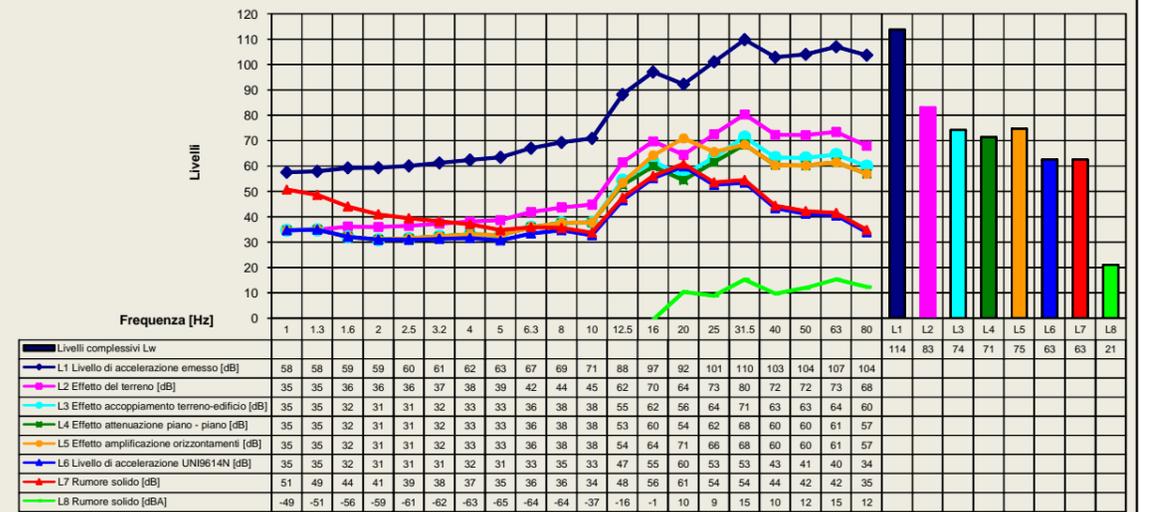


PUNTO	Localizzazione	Dest. d'uso	TIPOLOGIA	IMPATTO	Distanza calotta	Llim
MO035d	Borgata Garassini 64c, La Morra (CN)	Residenziale	C.A.	TBM	65 m	74 dB

Edificio di civile abitazione con struttura portante in c.a., fondazioni dirette su plinti in c.a., solai in c.a., a 2 piani fuori terra, in buono stato di conservazione, sito alla progressiva chilometrica Km 1+628, ad una distanza planimetrica dall'autostrada di 0 m e altimetrica di 72 m.

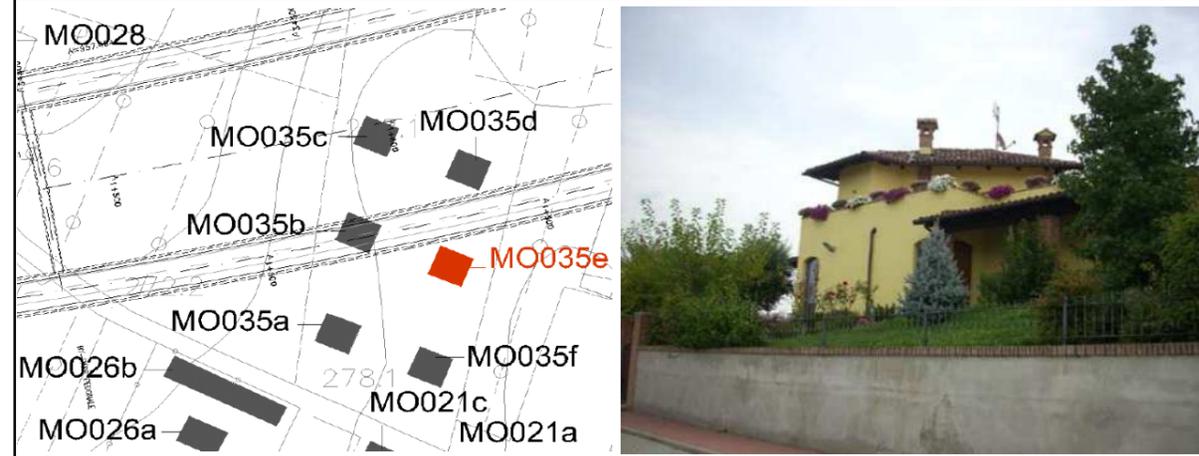


Impatto in costruzione (TBM) - Livelli di accelerazione e rumore solido  
 Livello massimo

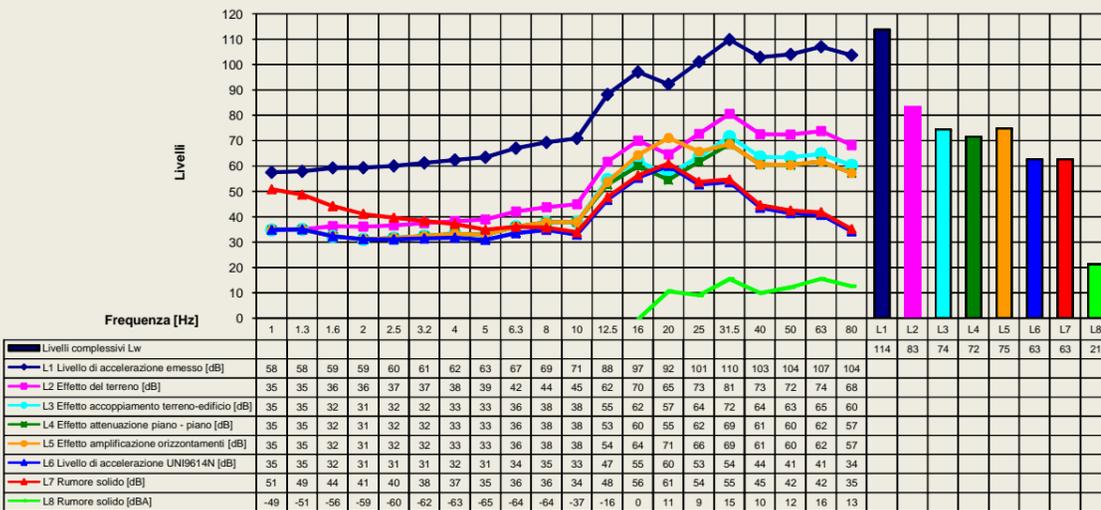


PUNTO	Localizzazione	Dest. d'uso	TIPOLOGIA	IMPATTO	Distanza calotta	Llim
MO035e	Borgata Garassini 64d, La Morra (CN)	Residenziale	C.A.	TBM	64 m	74 dB

Edificio di civile abitazione con struttura portante in c.a., fondazioni dirette su plinti in c.a., solai in c.a., a 2 piani fuori terra, in buono stato di conservazione, sito alla progressiva chilometrica Km 1+610, ad una distanza planimetrica dall'autostrada di 5 m e altimetrica di 72 m.

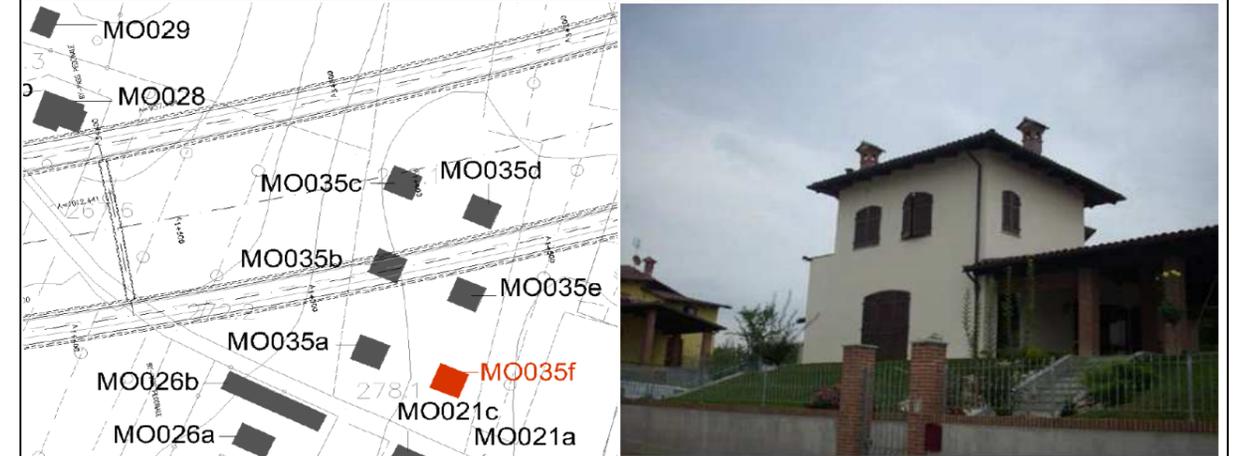


Impatto in costruzione (TBM) - Livelli di accelerazione e rumore solido  
 Livello massimo

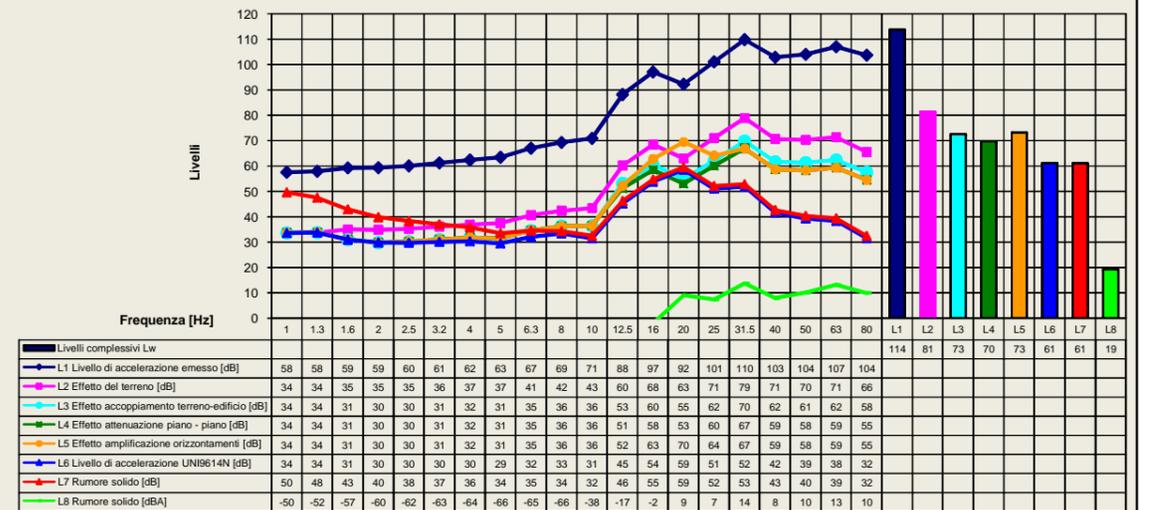


PUNTO	Localizzazione	Dest. d'uso	TIPOLOGIA	IMPATTO	Distanza calotta	Llim
MO035f	Borgata Garassini 64e, La Morra (CN)	Residenziale	C.A.	TBM	73 m	74 dB

Edificio di civile abitazione con struttura portante in c.a., fondazioni dirette su plinti in c.a., solai in c.a., a 2 piani fuori terra, in buono stato di conservazione, sito alla progressiva chilometrica Km 1+590, ad una distanza planimetrica dall'autostrada di 40 m e altimetrica di 71 m.



Impatto in costruzione (TBM) - Livelli di accelerazione e rumore solido  
 Livello massimo

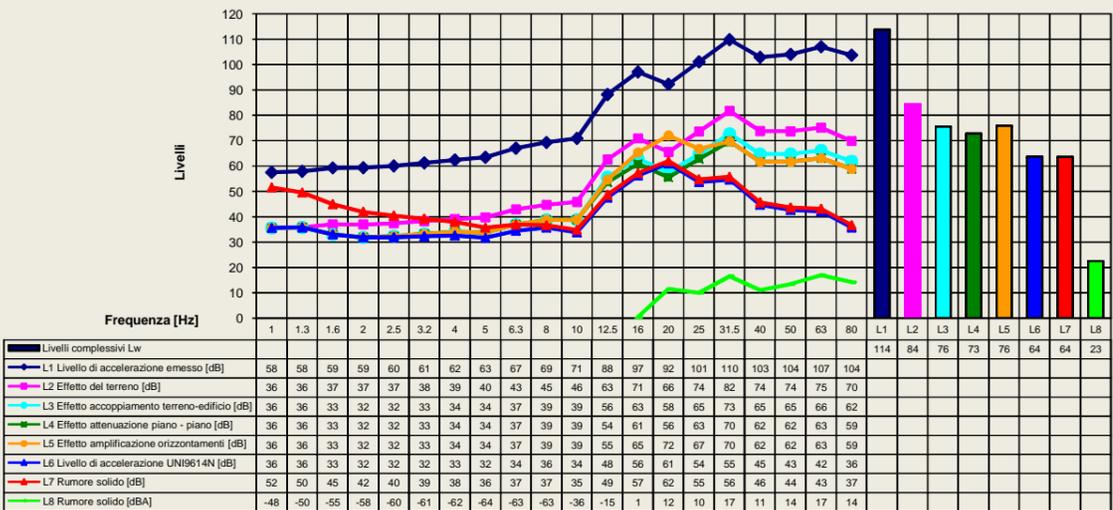


PUNTO	Localizzazione	Dest. d'uso	TIPOLOGIA	IMPATTO	Distanza calotta	Llim
MO026b	Borgata Garassini 65, La Morra (CN)	Residenziale	C.A.	TBM	59 m	74 dB

Edificio di civile abitazione con struttura portante in c.a., fondazioni dirette su plinti in c.a., solai in latero-cemento, a 2 piani fuori terra, in buono stato di conservazione, sito alla progressiva chilometrica Km 1+508, ad una distanza planimetrica dall'autostrada di 26 m e altimetrica di 65 m. L'edificio confina con altro edificio di civile abitazione, con struttura portante in muratura non armata, fondazioni dirette su plinti in muratura, solai in laterizio, a 2 piani fuori terra, in buono stato di conservazione.



Impatto in costruzione (TBM) - Livelli di accelerazione e rumore solido  
 Livello massimo

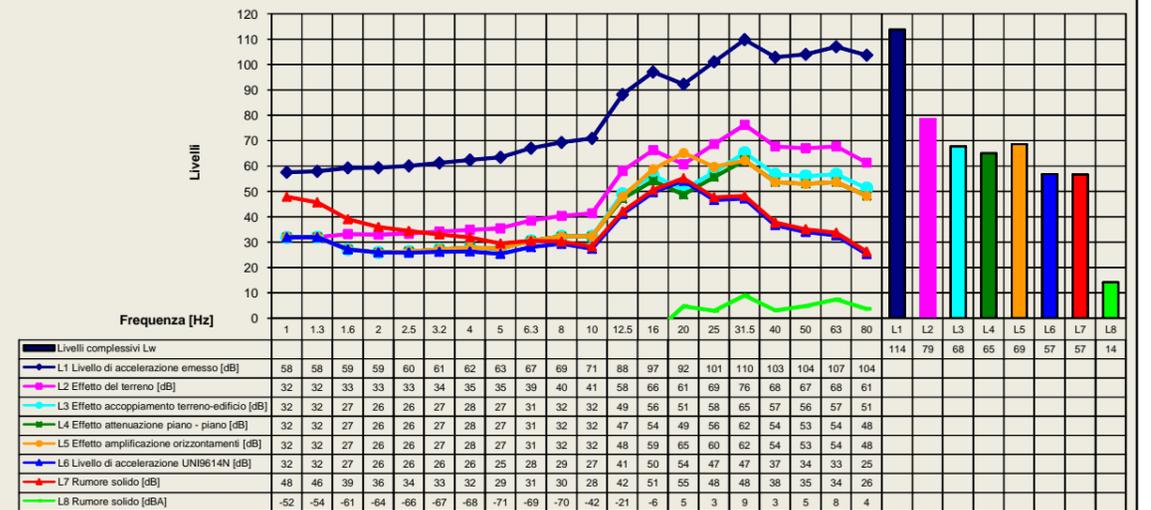


PUNTO	Localizzazione	Dest. d'uso	TIPOLOGIA	IMPATTO	Distanza calotta	Llim
MO001	Via Bricco dei Cogni 40, La Morra (CN)	Residenziale	MURATURA	TBM	88 m	74 dB

Edificio di civile abitazione con struttura portante in muratura portante non armata, fondazioni dirette su plinti in muratura, solai in laterizio, a 2 piani fuori terra, in buono stato di conservazione, sito alla progressiva chilometrica Km 1+940, ad una distanza planimetrica dall'autostrada di 1 m e altimetrica di 95 m. In adiacenza sono presenti edifici di analoga struttura adibiti a magazzino.



Impatto in costruzione (TBM) - Livelli di accelerazione e rumore solido  
 Livello massimo

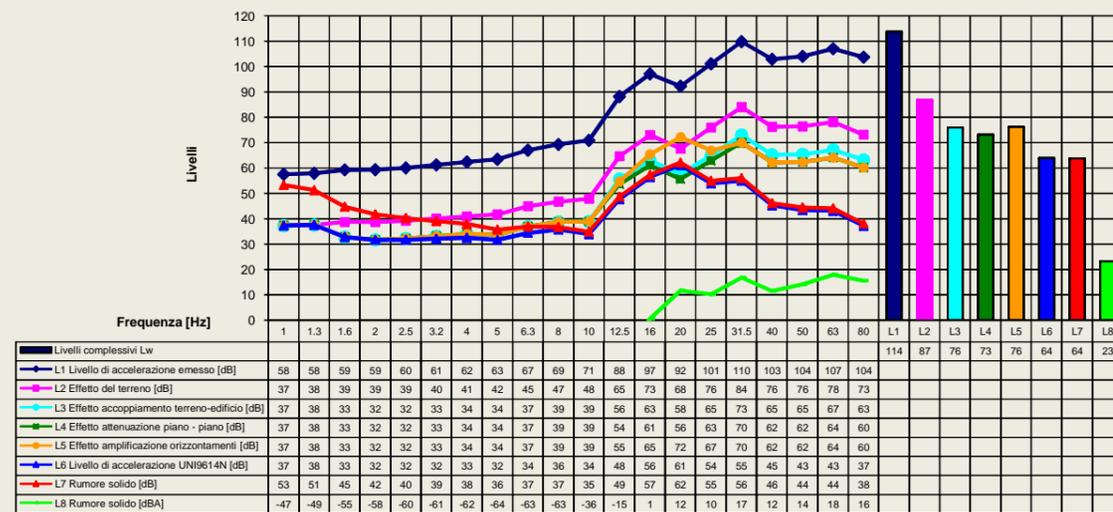


PUNTO	Localizzazione	Dest. d'uso	TIPOLOGIA	IMPATTO	Distanza calotta	Llim
VE010	Cascina Montemiglietto, Verduno (CN)	Residenziale	MURATURA	TBM	49 m	74 dB

Edificio di civile abitazione con struttura portante in muratura portante non armata, fondazioni dirette su plinti in muratura, solai in laterizio, a 2 piani fuori terra, sito alla progressiva chilometrica Km 3+200, ad una distanza planimetrica dall'autostrada di 5 m e altimetrica di 55 m.



Impatto in costruzione (TBM) - Livelli di accelerazione e rumore solido  
 Livello massimo



PUNTO	Localizzazione	Dest. d'uso	TIPOLOGIA	IMPATTO	Distanza calotta	Llim
VE010	Verduno (CN)	Commerciale Magazzino	C.A.	TBM	34 m	89 dB

Capannone prefabbricato a destinazione commerciale/magazzino con struttura portante in c.a., fondazioni dirette su plinti in c.a., a 1 piano fuori terra, sito alla progressiva chilometrica Km 3+640, ad una distanza planimetrica dall'autostrada di 35 m e altimetrica di 5 m.



Impatto in costruzione (TBM) - Livelli di accelerazione e rumore solido  
 Livello massimo

