

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

CUP C39B18000060006

CIG 7690329440

RIF. PERIZIA

P.3062

TITOLO PROGETTO

NUOVA DIGA FORANEA DEL PORTO DI GENOVA AMBITO BACINO SAMPIERDARENA

TITOLO ELABORATO:

STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE:
RISPOSTA ALLE RICHIESTE DI INTEGRAZIONE
FORMULATE DAL MiTE IN DATA 12/1/2022:

ALLEGATO M

ALLEGATO AL CAP. 19 – VIBRAZIONI

ELABORATO N°:

MI046R-PF-D-A-R-070-M-00

NOME FILE:

MI046R-PF-D-A-R-070-M-00.docx

DATA	ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO
16/2/2022	S. Casari/P. Panzeri	A. Lizzadro	F. Angelotti
REVISIONE	N°	DATA	DESCRIZIONE
	00	16/2/2022	EMISSIONE PER APPROVAZIONE

PROGETTISTI	PROGETTAZIONE
<p>Mandatario: </p> <p>Responsabile dell'integrazione delle prestazioni specialistiche Dott. Ing. Antonio Lizzadro</p> <p>   </p> <p>STUDIO BALLERINI INGEGNERI ASSOCIATI  ALBERTO ALBERT INGEGNERE</p>	<p></p> <p>Dott. Ing. Antonio Lizzadro</p>

D.E.C.	VERIFICATO	VALIDATO R.U.P.	IL RESP. DELL'ATTUAZIONE
Ing. Francesca Arena	RINA CHECK	Ing. Marco Vaccari	Dott. Umberto Benezzi
.....

AUTORITÀ DI SISTEMA PORTUALE DEL MAR LIGURE OCCIDENTALE

REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DIGA FORANEA DEL PORTO DI GENOVA AMBITO BACINO DI SAMPIERDARENA

PROGETTAZIONE DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

RISPOSTA ALLE RICHIESTE DI INTEGRAZIONE

FORMULATE DAL MITE IN DATA 12/1/2022

ALLEGATO M **CAP. 19 - VIBRAZIONI**

INDICE

1.	INTRODUZIONE	3
2.	OGGETTO DELLO STUDIO	4
3.	BIBLIOGRAFIA	5
4.	GENERALITÀ SUI FENOMENI VIBRATORI E RIFERIMENTI NORMATIVI	7
4.1.	Standard normativi per la valutazione del danneggiamento alle strutture da vibrazioni	8
4.2.	Norma ISO 4866	10
4.3.	Norma UNI 9916	15
4.4.	Standard normativi per la valutazione del disturbo da vibrazioni alle persone	20
4.4.1.	Norma ISO 2631-2	20
4.4.2.	Norma UNI 9614	22
4.4.3.	Norma UNI 9614, aggiornamento al 2017	27
4.5.	Il fenomeno fisico della trasmissione delle vibrazioni	35
4.5.1.	Disturbo alle persone	36
4.5.2.	Effetti delle vibrazioni sugli edifici	38
4.6.	Cenni sulle tipologie di modelli di previsione delle vibrazioni	41
4.7.	Studio previsionale vibrazionale	43
4.7.1.	Modalità di esecuzione dello studio previsionale	47
4.7.2.	Risultati della modellazione	50
4.7.3.	Considerazioni conclusive	55

1. INTRODUZIONE

Si riportano di seguito le richieste di chiarimenti in merito al tematismo delle vibrazioni.

Per l'analisi delle vibrazioni è necessario censire e indicare i ricettori potenzialmente esposti a tale componente e presenti nell'area di influenza, identificati con un codice univoco, indicando per ciascuno di essi la distanza, la destinazione d'uso e i limiti cui far riferimento. Occorrerà valutare e riportare i livelli vibrazionali sui ricettori censiti nelle condizioni operative attuali, di esercizio, attraverso stime e/o misure per lo stato attuale, da effettuarsi presso i ricettori i più esposti all'intervento di progetto

Il Proponente dovrà inoltre aggiornare lo studio di compatibilità dell'opera in relazione alle vibrazioni, stimando, sui ricettori presenti nell'area di influenza, i livelli vibrazionali, secondo la norma UNI 9614:2017

Il Proponente dovrà altresì stimare, con le stesse modalità, anche i livelli vibrazionali prodotti dalle attività di cantiere, nelle fasi più critiche per tipologia di lavorazioni, considerando tutte le sorgenti/macchinari/impianti previsti nel cantiere. I livelli vibrazionali prodotti dalle attività di realizzazione dell'opera di progetto dovranno essere stimati sempre secondo i parametri previsti dalla norma UNI 9614:2017, evidenziando potenziali situazioni di criticità

Nel caso in cui le valutazioni degli impatti vibrazionali effettuate ai sensi della norma UNI 9614:2017 evidenziassero situazioni di potenziale criticità, il Proponente dovrà individuare gli opportuni interventi e accorgimenti di mitigazione

2. OGGETTO DELLO STUDIO

Il presente studio tratta la valutazione previsionale dell'impatto vibrazionale connesso alle lavorazioni condotte nei cantieri funzionali alla realizzazione della nuova diga foranea di Genova.

Lo studio viene condotto in ottemperanza alle normative nazionali e regionali applicabili per lo specifico caso e riportate per completezza al paragrafo seguente.

Le aree di cantiere relative alla costruzione della nuova diga con parziale demolizione della diga esistente sono ubicate prevalentemente al largo della costa di Genova, ma sono state individuate anche sulla costa alcune aree di cantiere in corrispondenza delle quali avverranno gli attracchi dei pontoni da e per il cantiere marino, deputate a siti di raccolta e frantumazione inerti, preparazione dei prefabbricati, siti di stoccaggio e raccolta e, non ultimo, campo base per le lavorazioni.

Dal punto di vista vibrazionale non esistono documenti di piano ai quali corrispondano classificazioni del territorio. Il confronto tra livelli attesi e valori limite avviene pertanto unicamente nel rispetto dei disposti delle norme tecniche di riferimento applicabili e segnatamente la norma UNI 9916 per la possibile insorgenza di danni ai fabbricati e la norma UNI 9614 per la valutazione del disturbo alle persone.

Il complesso di attività di cui al presente report è stato oggetto del lavoro di un team costituito da Tecnici Competenti in Acustica Ambientale (TCAA) ed esperti di vibrazioni, coadiuvati anche da tecnici di campo per le fasi operative rappresentate dall'esecuzione dei rilievi acustici e vibrazionali finalizzati alla valutazione dello stato di fatto.

In particolare, responsabile della presente valutazione per conto della P&P Consulting Engineers è Ing. Paolo Panzeri, iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Bergamo dal 1984 al n. 1468 e riconosciuto come Tecnico Competente in Acustica Ambientale dalla Regione Lombardia con Decreto n. 1592 del 14 aprile 1998 ora convertito nell'Elenco Nazionale ENTECA (Elenco Nazionale dei Tecnici Competenti in Acustica) al n. 2022. L'Ing. Paolo Panzeri ha operato con la collaborazione dell'Ing. Stefano Casari, iscritto nell'Albo Professionale degli Ingegneri della Provincia di Bergamo dal 2002 al n. 2913, riconosciuto della Regione Lombardia quale «Tecnico Competente» nel campo dell'acustica ambientale ai sensi dell'art. 2 commi 6, 7, 8 della Legge n. 447/95 (Decreto N. 9921 del 2011) oggi riconosciuto all'interno dell'Elenco Nazionale ENTECA (Elenco Nazionale dei Tecnici Competenti in Acustica) al n. 1587.

3. BIBLIOGRAFIA

- Auersch L., “The excitation of ground vibration by rail traffic: theory of vehicle–track–soil interaction and measurements of high-speed lines”, *Journal of Sound and Vibration* 284 (2005)103–132
- Beranek L.L., Ver I.L., “Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications”, Interscience, 1992
- Chua K.H., Balendra T., Lo K.W. (1992), “Groundborne vibrations due to trains in tunnels”, *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol. 21, pp 445-460
- Cotana F., Rossi F., Nicolini A., “Characterization of Road Vehicle Induced Soil Vibration”, 18th International Congress on Acoustic – ICA 2004, Kyoto, Japan, 4-9 aprile 2004
- Degrande G., “Free field vibration measurements during the passage of a Thalys high speed train”, 2000
- Degrande G., Kogut J., Lombaert G., Pyl L., Haegeman W., Karl L., “Measurements and numerical validation of high speed train vibrations”, 299 Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical, Engineering, New York, 2004
- Degrande G., De Roeck G., Van Den Broeck P. and Smeulders D., “Wave propagation in layered dry, saturated and unsaturated poroelastic media”, *International Journal of Solids and Structures*, 1998, 35(34–35), 4753–4778
- Degrande, G. and Schillemans, L. “Free field vibrations during the passage of a HST”, *Proceedings of ISMA 23, Noise and Vibration Engineering*. Leuven, Belgium, 1998, vol. 3, pp. 1563–1570
- Harris C. M., “Shock and Vibration Handbook”, 1988, McGraw Hill
- Hunt H. E.M., “Measurement and Modelling of Traffic Induced Ground Vibration”, Ph.D. Thesis, Cambridge University, England, 1988
- Jaeger J.C., Cook N.G.W., “Fundamentals of Rock Mechanics”, Chapman and Hall, 1976
- Le Houdec D., “Modelling and Analysis of Ground Vibration Problems: a Review”, *Civil and Structural Engineering Computing*, Chapter 19, 2001
- Miller H. – Miller & Hanson Inc., “Transit Noise and Vibration. Impact assessment”, 1995, U.S. Department of Transportation, Washington D.C.
- Pezzoli P., “Le vibrazioni indotte dal traffico su rotaia e tecniche di previsione”, Estratto, *Ingegneria Ferroviaria* n°. IF – VI – 2004, pp 521 ÷ 545, Roma, giugno 2004
- Piali G., “Carta Geologica dell’Umbria”, 1995

- Richart F.E., Woods R.D., Hall J.R. (1970), “Vibrations of soils and foundations”, Prentice-Hall, Inc
- Rossi F., Nicolini A., “A simple model to predict train-induced vibration: Theoretical formulation and experimental validation”, Environmental Impact Assessment Review, Vol.23, Elsevier, 2003
- Saurenman H.J., Nelson J.T., Wilson G.P., “Handbook of urban rail noise and vibration control”, 1982, U.S. Department of Transportation, Washington D.C.
- Sheng X., Jones C.J.C., Thompson D.J., ”Prediction of ground vibration from trains using the wave number finite and boundary element methods”, Journal of Sound and Vibration 293 (2006)575–586
- Spagnolo R., “Manuale di Acustica”, UTET Libreria, Torino, 2001
- Victor V. Krylov, “Generation of Ground Vibrations by Superfast Trains”, Applied Acoustics 44 (1995) 149-1640 1995 Elsevier Science Limited
- Victor V. Krylov, “Vibrational impact of high-speed trains. I. Effect of track dynamics”, 1996, Acoustical Society of America PACS numbers: 43.40.At, 43.40.Kd
- Watkins L.H., “Environmental impact of roads and traffic” - Appl. Science Publ., 1990
- Norma ISO 4866, “Mechanical Vibration and shock – vibration of fixed structures – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures”
- Norma UNI 9916, “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici”
- Norma ISO 2631-2, “Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2:Vibration in buildings (1 to 80 Hz)”
- Norma UNI 9614, “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo”
- Norma UNI 11048 “Vibrazioni meccaniche ed urti – Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo”

4. GENERALITÀ SUI FENOMENI VIBRATORI E RIFERIMENTI NORMATIVI

Nel caso delle vibrazioni la legislazione italiana non ha ancora adottato criteri valutativi, né identificato dei valori limite per i fenomeni vibratorii che possano indurre disturbo negli edifici o danni strutturali. Per valutare effetti e possibili impatti per esposizione a vibrazione, si fa quindi riferimento alle tecniche di buona prassi, identificate con la normativa tecnica nazionale ed internazionale (UNI, ISO, ANSI, ecc).

Qui di seguito vengono riportati i principali documenti (norme ISO ed UNI) attualmente vigenti sull'inquinamento indotto dalle vibrazioni ai quali, in mancanza di specifiche norme di legge, si fa normalmente riferimento nella trattazione della specifica componente ambientale.

- Norma ISO 4866, “Mechanical Vibration and shock – vibration of fixed structures – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures”
- Norma UNI 9916, “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici”
- Norma ISO 2631-2, “Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1 to 80 Hz)”
- Norma UNI 9614, “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo”, successivamente integrata dalla Norma UNI 11048 “Vibrazioni meccaniche ed urti – Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo” e poi recentemente aggiornata nel suo complesso nel 2017

Le numerose esperienze in materia di valutazione d’impatto ambientale indotto dai fenomeni di vibrazione hanno generalmente permesso di individuare valori limite di soglia e, più in generale, criteri di sicurezza, oltre i quali si possono verificare danni alle strutture o disturbo agli abitanti delle zone limitrofe alla sorgente vibratoria.

I limiti stabiliti a livello normativo dagli standard tecnici nazionali ed internazionali sono stati individuati considerando diversi parametri, quali il range di frequenza e di ampiezza della vibrazione, le caratteristiche temporali del fenomeno (continuo o transiente), il numero di eventi transienti, il tempo di esposizione, l’influenza del suolo, il tipo e lo stato di conservazione delle strutture da salvaguardare.

Tra i parametri caratteristici dell’onda vibratoria, quello che sperimentalmente viene più utilizzato è la velocità massima delle particelle che può provocare spostamenti differenziali di fondazioni, sollecitazioni, innesci di frane in zone caratterizzate da condizioni di

equilibrio limite, e, per valori più elevati, anche fratturazione negli ammassi rocciosi. Sulla base di queste considerazioni, le normative tecniche esprimono i livelli massimi di vibrazione in termini di massima componente di velocità delle particelle, o massimo vettore o massimo pseudovettore di velocità delle particelle. Le normative vigenti cercano di fornire gli elementi necessari per ricostruire uno scenario internazionale definito in materia di misurazioni di vibrazioni, anche se, in alcuni punti, non è ancora completo, come la mancanza della valutazione dell'influenza del tipo di terreno, o la libera scelta di una parte della catena di misura (modalità di accoppiamento tra trasduttore e superficie di misura). A questo proposito, la più importante ed esauriente norma attualmente disponibile è la ISO 4866, che contiene disposizioni e linee guida adottate come principale riferimento dalla maggior parte delle normative internazionali.

Appare perciò opportuno fare una panoramica dei più importanti standard e raccomandazioni in materia di vibrazione, evidenziandone le principali caratteristiche ed innovazioni. Per completezza verranno riportati anche i principali standard normativi relativi al disturbo ed ai livelli di tollerabilità per le attività umane.

4.1. Standard normativi per la valutazione del danneggiamento alle strutture da vibrazioni

In realtà, la valutazione dei livelli di vibrazione che possono essere indotti negli edifici senza provocare danni è estremamente complessa poiché, accanto al valore assoluto della grandezza misurata, è necessario tener conto della natura, della durata e della ripetibilità del fenomeno nonché della risposta dell'edificio o dei suoi elementi strutturali. La risposta è inoltre fortemente influenzata dalla tipologia edilizia, dai materiali utilizzati, dallo stato di conservazione, dalle modalità di interazione fra strutture e terreno e dalle caratteristiche meccaniche del terreno stesso.

Un aspetto importante riguarda la possibile coincidenza fra le frequenze del moto vibratorio e le frequenze proprie della struttura o di alcuni suoi componenti: in tal caso, si verifica risonanza con conseguente amplificazione della risposta, tanto più accentuata quanto minore è lo smorzamento strutturale.

Le frequenze dovute al traffico ed alle attività di cantiere si collocano, per lo più, fra 1 e 45 Hz, o poco più per i cantieri, mentre la frequenza fondamentale della maggior parte degli edifici ricade tra 0,1 e 10 Hz. Gli edifici storici sono, invece, più rigidi delle costruzioni moderne, pertanto mostrano frequenze naturali più alte.

L'analisi delle frequenze proprie degli edifici considerati nel loro complesso non esaurisce lo studio dei possibili fenomeni di risonanza che possono manifestarsi anche in singoli

elementi strutturali. Anzi, poiché questi hanno frequenze proprie che coprono intervalli più vasti (generalmente, le frequenze proprie degli elementi strutturali variano da 5 a 60 Hz) e si avvicinano maggiormente a quelli della forzante, è molto più probabile che gli effetti di risonanza interessino solo alcune parti di un edificio.

Altro aspetto essenziale per una corretta ed esauriente valutazione dei danni possibili agli edifici è costituito dall'analisi del tipo di sorgente (traffico, esplosioni, battitura di pali, cantieri ecc.). In relazione ad essa, infatti, si modificano le modalità in cui i danneggiamenti possono essere prodotti. Una possibile classificazione dei modi di danneggiamento prevede che le vibrazioni da traffico, ma non solo, agiscano essenzialmente in tre diverse forme:

- attraverso gli effetti dovuti alle sole vibrazioni
- per gli effetti prodotti dalle vibrazioni che si sovrappongono ad una concentrazione di sollecitazioni dovute ad altre cause
- per gli effetti di fatica, dovuti, cioè, alla ripetizione dei fenomeni

Di particolare interesse, perché maggiormente ricorrenti, soprattutto negli edifici recenti, sono i danni prodotti dalle associazioni fra le vibrazioni da traffico e sollecitazioni di altra natura.

La complessità del problema e la mancanza di informazioni, non rende possibile stabilire con assoluta certezza quali ampiezze e quali frequenze di vibrazione siano pericolose per produrre danni alle strutture, anche se possono essere fatte stime ragionevoli. La letteratura in materia offre valutazioni, talvolta fortemente divergenti, probabilmente a causa dell'origine sperimentale delle conclusioni dei vari autori e perciò condizionate da situazioni locali e specifiche.

Accordo pressoché unanime sembra, al contrario, eleggere il valore di picco della componente verticale della velocità quale indice più qualificante il livello di vibrazione. Anche la necessità di costruire una classificazione degli edifici è comunemente avvertita. L'orientamento della letteratura più recente è di assumere limiti comunque più cautelativi per la sicurezza degli edifici antichi, storici e monumentali. Infatti, le costruzioni così catalogabili, hanno quasi sempre ampiamente superato la vita media per cui potevano essere state costruite e sono spesso state sottoposte a rilevanti e ripetuti stati di sollecitazione (per esempio per variazioni termiche, cedimenti differenziali delle fondazioni, eventi sismici, ecc.). Da ultimo, di grande interesse è la possibilità della forzante di essere caratterizzata da frequenze più prossime alla frequenza fondamentale degli edifici più rigidi, quali appunto sono gli edifici antichi.

La vibrazione indotta da carichi dinamici produce quindi sollecitazioni e deformazioni sulle strutture che, come detto, possono provocare danni strutturali anche ingenti. L'entità di tali danni dipende dall'interazione del fenomeno vibratorio con il tipo di fondazione, lo stato di conservazione dell'edificio, ma soprattutto le caratteristiche della vibrazione che investe la struttura. I danni o le lesioni causate a edifici, manufatti e strutture possono essere classificati, in funzione della loro entità, in tre categorie:

1. danni "estetici": si formano piccole fessure negli intonaci senza interessamento delle murature o degli elementi strutturali. Tali fessure si osservano generalmente in corrispondenza di punti singolari del manufatto quali aperture delle pareti (porte e finestre) o giunzioni fra elementi della costruzione (angoli, spigoli, contatti delle pareti con solai, travi, ecc.);
2. fessure più aperte, caduta di pezzi di intonaco, distacchi di mattonelle, rottura di marmi e vetri;
3. danni che interessano la statica della struttura.

Per valutare gli effetti indotti dai fenomeni vibratorii sulle strutture da salvaguardare, sono utilizzati soprattutto gli standard normativi nazionali ed internazionali, descritti nel seguito di questo paragrafo.

4.2. Norma ISO 4866

La norma ISO 4866 stabilisce il valore limite di soglia in funzione di alcuni parametri, quali la durata del fenomeno vibratorio, il range di frequenza, la tipologia e lo stato di conservazione delle strutture, le frequenze naturali e lo smorzamento caratteristico delle strutture, la dimensione della struttura e l'influenza del suolo, proponendo una metodologia di misurazione ed un procedimento di analisi e valutazione delle misure.

La durata della vibrazione indotta da un carico dinamico è definita come:

$$\tau_r = \frac{1}{2\pi\zeta_r f_r}$$

dove:

ζ_r è lo smorzamento che subisce la vibrazione

f_r è la frequenza di risonanza

In base a questa definizione, la normativa suddivide il fenomeno vibratorio in vibrazione continua ($> 5 \tau_r$) o transiente ($< 5 \tau_r$).

Il range di frequenza di interesse è individuato tra 0,1 Hz e 300 Hz, mentre il range di ampiezza è compreso tra 100 e 2500 μm .

Lo Standard classifica le strutture in categorie in funzione della tipologia di fondazione e della natura del terreno (Allegato B). Le categorie sono otto per due diversi gruppi di edifici; in particolare, al primo gruppo appartengono strutture in muratura portante, in pietra, tufo o mattoni, costruzioni pesanti con coefficienti di smorzamento molto elevati e strutture elastiche tipiche delle zone sismiche; al secondo appartengono edifici di recente costruzione con scheletro in cemento armato o con elementi prefabbricati in cemento armato o precompresso. Sono strutture leggere con coefficienti di smorzamento più bassi.

Le classi delle fondazioni individuate dalla normativa dipendono dal tipo di comportamento al variare della lunghezza d'onda e sono tre:

- CLASSE A: pali legati in calcestruzzo armato, acciaio o legno, platee rigide in cemento armato e muri di sostegno a gravità
- CLASSE B: pali non legati in cemento armato o legno e fondazioni continue a trave rovescia
- CLASSE C: muri di sostegno leggeri, fondazioni massicce in pietra o strutture prive di fondazioni

Infine, le sei categorie caratterizzanti il tipo di terreno sono:

- Tipo a: rocce non fessurate, rocce molto solide leggermente fessurate e sabbie cementate
- Tipo b: terreni compattati a stratificazione orizzontale
- Tipo c: terreni poco compattati a stratificazione orizzontale
- Tipo d: piani inclinati, con superficie di scorrimento potenziale
- Tipo e: terreni granulari, sabbie, ghiaie (senza coesione) e argille coesive sature
- Tipo f: materiale di riporto

La successiva integrazione alla normativa ha aggiunto la valutazione dell'interazione tra terreno e fondazione descrivendone i conseguenti effetti (Allegato E).

La combinazione tra le precedenti classificazioni (categorie del tipo di struttura, del tipo di fondazione e della tipologia del terreno) è stata schematizzata nella tabella seguente dove sono riportate le classi degli edifici in funzione della resistenza alle vibrazioni.

Classe edificio*	Categoria di struttura							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Classe di fondazione (maiuscolo) e tipo di terreno (minuscolo)							
1	Aa							
2	Ab	Aa	Aa	Aa				
3		Ab,Ba	Ab,Ba	Ab	Aa,AB			
4		Ac,Bc	Bc	Ac	Ac,Ba,Bb			
5		Bc	Ac		Bc	Ba		
6		Af		Ad	Bd	Bb,Ca	Ba	
7			Af	Ae	Be	Bc,Cb	Bb,Ca	
8						Be,Cc	Bc,Cb	
9		Bf				Cd	Bd,Cc	Aa
10			Bf			Ce	Be,Cd	Ab
11				Cf	Cf		Ce	Ba
12						Cf		Bc,Ca
13							Cf	Bd,Cb,Cc
14								Cd,Ce,Cf

*Numero di classe elevato = minore resistenza meccanica alle vibrazioni

Tabella 1 - Classificazione degli edifici in funzione della resistenza alle vibrazioni

La norma evidenzia, inoltre, l'importanza della frequenza di vibrazione naturale degli edifici e perciò propone una metodologia per la sua determinazione che prevede l'utilizzo di eccitatori o di equazioni empiriche (Allegato D).

La norma non stabilisce tuttavia valori limite di soglia, ma propone una metodologia di misurazione che prevede la scelta del tipo di trasduttore (geofono o accelerometro) ed individua le posizioni dei trasduttori in corrispondenza delle fondazioni e sul suolo al fine di determinare la relativa funzione di trasferimento. Contemporaneamente, la ISO 4866 prevede l'esecuzione di misure all'interno della struttura fissando le posizioni di sensori in corrispondenza del piano più alto, per strutture al massimo di 4 piani, e stazioni di misura ad intervalli di 10 m, nel caso di edifici più larghi di 10 m. La posizione dei trasduttori inoltre dovrà essere scelta in funzione del modo proprio di vibrare della struttura che genera deformazioni e sollecitazioni maggiori.

La tecnica di montaggio del trasduttore sugli elementi strutturali da utilizzare può essere scelta tra le tecniche di accoppiamento fornite dalla norma ISO 5348, mentre per un accoppiamento tra sensore e terreno è raccomandato un montaggio che eviti slittamenti e distorsioni, che sia il più rigido possibile soprattutto per accelerazioni maggiori di 2 m/s^2 . A tale scopo, la norma propone, per terreni, di sotterrare il trasduttore o di montarlo su un supporto rigido scelto in base alla seguente espressione:

$$\frac{m}{\rho r^3} < 2$$

dove:

m è la massa del trasduttore e del supporto

r è il raggio equivalente del supporto

ρ è la densità del suolo, compresa tra 1500 kg/m³ e 2600 kg/m³

La norma conclude la trattazione della stima di fenomeni vibratori consigliando una metodologia di analisi del segnale che preveda il calcolo dello spettro nel dominio della frequenza applicando la Trasformata di Fourier.

Di particolare interesse, infine, la trattazione che la norma fa in riferimento al range in frequenza ed all'ampiezza tipiche delle vibrazioni che possono interessare gli edifici. Le tabelle riportate in Allegato A presentano il range delle risposte strutturali per differenti tipi di sollecitazioni (§ seguente Tabella 2) ed i valori tipici di tali risposte in corrispondenza a specifiche condizioni di misura (§ successiva Tabella 3).

Vibration source	Frequency range ^a Hz	Amplitude range μm	Particle velocity range mm/s	Particle acceleration range m/s ²	Time characteristic
Traffic road, rail, ground-borne	1 to 100	1 to 200	0,2 to 50	0,02 to 1	C ^b /T ^c
Blasting vibration ground-borne	1 to 300	100 to 2 500	0,2 to 100	0,02 to 50	T
Air over pressure	1 to 40	1 to 30	0,2 to 3	0,02 to 0,5	T
Pile driving ground-borne	1 to 100	10 to 50	0,2 to 100	0,02 to 2	T
Machinery outside ground-borne	1 to 100	10 to 1 000	0,2 to 100	0,02 to 1	C/T
Machinery inside	1 to 300	1 to 100	0,2 to 30	0,02 to 1	C/T
Human activities inside	0,1 to 30	5 to 500	0,2 to 20	0,02 to 0,2	T
Earthquakes	0,1 to 30	10 to 10 ⁵	0,2 to 400	0,02 to 20	T
Wind	0,1 to 10	10 to 10 ⁵	—	—	T
Acoustic (inside)	5 to 500	—	—	—	C/T

NOTE 1 The ranges quoted are extreme, but they still indicate the values which may be experienced and which may have to be measured (see also Note 2). Extreme ranges of displacement amplitudes and frequencies have not been used to derive particle velocities and accelerations. Values lower than 0,2 mm/s can also be considered. For building security and human annoyance, these values may be insignificant, but for sensitive equipments they are significant.

NOTE 2 Vibration values within the given ranges may cause concern. There are no standards which cover all varieties of structures, conditions and durations of exposure, but many national codes associate the threshold of visible (or otherwise noticeable) effects with peak particle velocities at the foundation of a structure of more than a few millimetres per second. A significant damage is linked to peak particle velocities of several hundred millimetres per second. Vibration levels below the threshold of human perception may be of concern in delicate and industrial processes.

^a Ranges quoted refer to the response of structures and structural elements to a particular type of excitation and are indicative only.

^b Continuous.

^c Transient.

Tabella 2 - Range delle risposte strutturali degli edifici a differenti tipi di sollecitazioni

Vibration source	Frequency Hz	Amplitude mm/s	Measuring location	Distance m
Blasting demolition	75 to 120	2,7	main structure foundation	10 to 20
	5 to 11	4,3		
	5 to 7	2,5	main structure foundation	
	86	2,1	main structure foundation	
	6	4,8		
	89	2,1	main structure foundation	
	7	8,7		
	95 to 107	2,2	main structure foundation	
	9 to 14	13,4		
	7	3,5	main structure foundation	
	7	1,5	main structure foundation	
	8	0,7	main structure foundation	
	10	1,7	main structure foundation	
	10	1,4	main structure foundation	
	7	2,1	main structure foundation	
	7	1,8	main structure foundation	
	9	2,8	terrace	
	8	3,4	2nd basement	
	9	2,1	2nd basement	
	8	5,7	ground floor	
9	10,0	ground floor		
7	6,1	basement		
7	5,2	basement		
7	5,4	ground floor		
6	7,2	ground floor		
7	15,1	terrace		
8	7,2	ground floor		
Forging hammers	10 to 25	0,8	main structure foundation	30
	6 to 20	0,2	main structure foundation	
	8 to 10	2,5	main structure foundation	
Quarry blasting	28	3,3	main structure foundation	200
	36	3,7	main structure foundation	
	27	1,8	main structure foundation	
Petroleum vibrators	26	6,1	main structure foundation	6,5
Mass pile driving	10 to 20	1,6	foundation	14
	10 to 20	2,0	flooring tile	14
Vibrating pile driving	20	2,6	foundation	14
	20	4,3	flooring tile	14
Concrete cruncher	3	7,5	5th floor	10
Rock breaker	35	9,9	5th floor	15
Road traffic	10 to 15	0,2 to 1,0	main structure foundation	5 to 10
	12 to 20	0,4 to 0,6	floor	
	12 to 15	2,0 to 2,5	main structure foundation	
	12 to 15	2,5 to 3,5	floor	
	10	1,0 to 1,3	main structure foundation	
	17	3,5 to 5,3	floor	
	11 to 13	1,0	floor	
	3 to 4	1,0 to 1,4	main structure foundation	
	3 to 4	1,5 to 2,1	floor	
	9 to 12	0,5 to 1,2	main structure foundation	
	9 to 12	0,5 to 1,2	floor	
10 to 15	1,2 to 1,7	main structure foundation		
10 to 45	0,5 to 1,5	main structure foundation		
10 to 20	0,2	main structure foundation		
10 to 20	0,4 to 2,0	centre of paving stone		
Railway traffic	35	1,5 to 2,0	main structure foundation	10 to 20
	8 to 50	2,0 to 3,0	main structure foundation	
	60	2,0	main structure foundation	
	10	0,5	main structure foundation	
	51	1,9	main structure foundation	
	20	2,2	main structure foundation	
	90 to 110	2,5	main structure foundation	

Tabella 3 - Esempi tipici dei valori delle risposte strutturali degli edifici a specifiche sollecitazioni e condizioni di misura

4.3. Norma UNI 9916

La norma UNI 9916 fissa limiti di accettabilità delle vibrazioni limitandosi però ai soli effetti delle vibrazioni che comportano l'insorgere di "danno architettonico o di soglia". I valori e le metodologie semplificate in essa riportati non sono generalmente applicabili ai casi di insorgenza di "danno maggiore", per il quale è necessario ricorrere a valutazioni ed approfondimenti specifici.

In letteratura e nelle Normative emanate dai vari enti nazionali preposti, come già accennato, si riscontra una grande varietà e casistica di livelli di vibrazione ritenuti accettabili e ciò non consente di individuarne di universalmente validi. Al contrario, i valori forniti dalle diverse fonti sono da ritenersi orientativi e sfruttabili solo in concomitanza delle condizioni in cui sono stati ricavati o delle circostanze cui fanno riferimento.

I parametri di valutazione da prendere normalmente in considerazione, così come definiti dalla norma UNI 9916, sono i seguenti:

➤ velocità di picco puntuale (p.p.v.), ovvero il valore massimo del modulo del vettore velocità misurato in un dato punto. La determinazione della velocità di picco puntuale (p.p.v.) richiede la misurazione simultanea delle tre componenti mutuamente perpendicolari della velocità nel punto considerato (di solito due componenti orizzontali e quella verticale).

➤ velocità di picco di una componente puntuale (p.c.p.v.) (peak component particle velocity), ovvero il valore massimo del modulo di una delle tre componenti ortogonali misurate simultaneamente in un punto o ottenute mediante integrazione.

La stessa UNI 9916, lungi tuttavia dall'offrire una griglia completa e coerente di valori di soglia, in appendice D, riporta quanto in merito contenuto già anche in altre Norme nazionali, in particolare nelle DIN 4150 (1999) e nelle BS 7385 (1993). Entrambe fanno genericamente riferimento alla velocità di picco della singola componente (peak component particle velocity, PCPV) che, in alcuni casi, cioè quando il valore di riferimento fornito dalle Norme varia con la frequenza, deve essere associata ad una o più frequenze che sono predominanti nella registrazione. Le Norme suggeriscono procedimenti atti ad individuare le frequenze dominanti.

Si rende necessaria, a questo punto, un'importante precisazione sul significato delle soglie: esse rappresentano livelli al di sotto dei quali, salvo casi particolari, è ragionevole presumere che non vi sia danno; il superamento dei limiti indicati non implica necessariamente il verificarsi del danno, ma è un segnale della necessità di indagini più approfondite [Appendice D, D.2].

La DIN 4150-3 considera tre classi di edifici:

- edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili
- edifici residenziali e costruzioni simili
- costruzioni che non appartengono alle prime due categorie e sono degne di essere tutelate (e.g. monumenti storici)

Eseguite le misurazioni sia in fondazione che ai piani superiori, con particolare rilievo al più elevato, secondo tre assi ortogonali che si ritiene forniscano un quadro globale della risposta dell'edificio, si confrontano i dati sperimentali con i valori limite differenziati per vibrazioni di breve durata e permanenti. Si definiscono di breve durata le vibrazioni tali da escludere fenomeni di fatica e amplificazioni dovute a risonanza; sono permanenti, per contro, le vibrazioni che possono produrre fenomeni di fatica o subire amplificazioni per risonanza.

Le vibrazioni vengono quantificate in termini di velocità, ma mentre le UNI fanno riferimento alla velocità massima, le DIN si riferiscono alla velocità istantanea secondo l'espressione

$$v_i = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}$$

in cui v_x , v_y e v_z sono i valori istantanei delle velocità nelle tre direzioni.

La differenza fondamentale, che determina la non coincidenza di velocità istantanea secondo la formula sopra riportata e velocità massima, risiede nell'improbabile contemporaneità dei massimi valori di velocità nelle tre direzioni: la velocità istantanea risulterà, quindi, inferiore alla velocità massima. Pertanto, in altri criteri, questa formulazione viene utilizzata in una versione corretta da un fattore di sicurezza.

I valori di riferimento relativi alle vibrazioni di breve durata (transitoria), ossia quei valori della p.c.p.v. che escludono qualsiasi problema di fatica e/o di amplificazioni dovute a fenomeni di risonanza della struttura interessata, sono riportati nella seguente Tabella 4, mutuata da quanto riportato anche nella DIN 4150-3 in riferimento ai valori limite.

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

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

Tabella 4 - Valori di riferimento per la velocità di vibrazione (p.c.p.v.)

al fine di valutare l'azione delle vibrazioni di breve durata sulle costruzioni

Limitatamente alle prime due classi di edifici, per la componente verticale dei singoli solai la norma indica come valore di riferimento della p.c.p.v 20 mm/s. Tale valore è indipendente dal contenuto in frequenza dei dati registrati.

I valori di riferimento relativi alle vibrazioni permanenti (continue), che possono indurre fenomeni di fatica e/o di amplificazioni dovute a fenomeni di risonanza della struttura interessata, sono invece riportati nella seguente Tabella 5.

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

Tabella 5 - Valori di riferimento per le componenti orizzontali della velocità di vibrazione (p.c.p.v.)

al fine di valutare l'azione delle vibrazioni durature sulle costruzioni

Limitatamente alle prime due classi di edifici, per la componente verticale dei singoli solai la norma indica 10 mm/s come valore di riferimento della p.c.p.v. Tale valore è indipendente dal contenuto in frequenza.

Questi valori di riferimento sono utilizzati per tutti i piani e per le fondazioni; in generale, risulterà più significativa la misurazione al piano alto.

La BS 7385 (“Evaluation and measurement for vibration in buildings. Part 2: Guide for damage levels from groundborne vibration” - 1993) tratta solo il caso di vibrazioni trasmesse dal terreno (cioè sono escluse le vibrazioni prodotte da sorgenti all’interno

dell'edificio, le onde sismiche e le sovrappressioni da aria o vento). In Tabella 6 si riportano le soglie che sono applicabili a edifici bassi (massimo di tre piani) e riguardano vibrazioni transitorie che non danno luogo a risonanza nella struttura (viceversa, i limiti vanno ridotti del 50%). Per frequenze minori di 4 Hz la Norma richiede di verificare che, da zero al picco, lo spostamento non superi 0,6 mm.

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).				

Tabella 6 - Valori di riferimento della velocità di vibrazione (p.c.p.v.)

al fine di valutare l'azione delle vibrazioni transitorie sulle costruzioni - BS 7385, part 2

La BS 5228, Part 4 (“Noise control on construction and open sites – Code of practice for noise and vibration control applicable to piling operations” – 1992) riguarda invece il caso di vibrazioni prodotte dalla battitura di pali, ove si considera la velocità di picco della particella, cioè il picco nel tempo del modulo del vettore velocità. I valori riportati in Tabella 7 costituiscono i limiti al di sotto dei quali si ritiene che non si verifichino danni minori (cosmetic). Se la vibrazione è continua i valori indicati devono essere ridotti del 50%.

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 ^{*)}	Da 10 Hz fino a 50 Hz	Da 50 Hz fino a 100 Hz ^{*)}
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.				

Tabella 7 - Valori di riferimento della velocità di vibrazione (p.p.v.)

al fine di valutare l'azione delle vibrazioni transitorie sulle costruzioni BS 5228 - part 4

Infine, in appendice D alla UNI 9916, vengono riportati i valori di riferimento nel caso di scoppio di mine, vibrazioni prodotte dal funzionamento di macchine da cantiere e dal traffico stradale e ferroviario, stabiliti dalla Norma Svizzera SN 640312 (“Effets des ébranlements sur les constructions” – 1992). La Norma (§ seguente Tabella 8) non è applicabile alle frequenze minori di 8 Hz, né vale per gli effetti indiretti. Ancora una volta, la grandezza di riferimento è la PPV, cioè il picco nel tempo del valore del modulo della velocità. I valori di riferimento, forniti in funzione della frequenza dominante della vibrazione, determinata dall’analisi spettrale della componente del vettore velocità con ampiezza maggiore, rappresentano la soglia al di sotto della quale piccoli danni sono ritenuti poco probabili.

Classe	Tipo di costruzione	Esposizione	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.p.v. in mm/s		
			Posizioni di misura ^{*)}		
			Da 8 Hz fino a 30 Hz ¹⁾	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.					

Tabella 8 - Valori di riferimento della velocità di vibrazione (p.p.v.)

al fine di valutare l'azione delle vibrazioni transitorie sulle costruzioni - SN 640312

Sono considerati i casi:

- vibrazioni occasionali (numero di oscillazioni eccedenti il 70% del valore di velocità di riferimento maggiore di 1000)
- frequenti (numero di oscillazioni significative compreso fra 1000 e 100.000)
- permanenti (numero di oscillazioni significative maggiore di 100.000)

Le vibrazioni da traffico, probabilmente al fine di tener conto degli effetti di fatica, sono classificate tra le permanenti. La Norma ritiene che l'edificio sia sottoposto ad una sollecitazione quando il valore massimo della velocità è pari a 0,7 volte il valore consigliato. Quanto alle classi di sensibilità delle costruzioni, vengono considerate le seguenti:

- molto poco sensibili, ad esempio, i ponti in acciaio o in cemento armato, opere di sostegno e altre, ma nessun tipo di edificio
- poco sensibili, ovvero gli edifici industriali sia in cemento armato che in acciaio
- normalmente sensibili, come gli edifici adibiti a civile abitazione in muratura o in cemento armato e gli edifici pubblici (scuole, ospedali, chiese, etc.)
- particolarmente sensibili, costituiti dalle costruzioni storiche

4.4. Standard normativi per la valutazione del disturbo da vibrazioni alle persone

4.4.1. Norma ISO 2631-2

La Norma 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 compreso tra 1 e 80 Hz, mentre il parametro di valutazione è il valore efficace dell'accelerazione (a)RMS definito come:

$$a(RMS) = \frac{1}{T} \int a^2(t) dt$$

dove:

$a(t)$ è l'accelerazione istantanea in funzione del tempo

T è la durata dell'integrazione nel tempo del quadrato dell'accelerazione istantanea

La Norma definisce tre curve base per le accelerazioni e tre curve base per le velocità, che rappresentano le curve approssimate di uguale risposta, in termini di annoyance della popolazione.

Nella seguente Tabella 9, sono indicati i valori numerici per le curve base delle accelerazioni riferite, rispettivamente, all'asse z, agli assi X e Y ed agli assi combinati X, Y e Z.

FREQUENZA	ACCELERAZIONE x 10		
	Asse Z	Assi X,Y	Assi combinati
1	10	3.6	3.6
1.25	8.9	3.6	3.6
1.6	8	3.6	3.6
2	7	3.6	3.6
2.5	6.3	4.51	3.72
3.15	5.7	5.68	3.87
4	5	7.21	4.07
5	5	9.02	4.3
6.3	5	11.4	4.6
8	5	14.4	5
10	6.3	18	6.3
12.5	7.81	22.5	7.8
16	10	28.9	10
20	12.5	36.1	12.5
25	15.6	45.1	15.6
31.5	19.7	56.8	19.7
40	25	72.1	25
50	31.3	90.2	31.3
63	39.4	114	39.4
80	50	144	50

Tabella 9 - Valori numerici per le curva base delle accelerazioni

In sintesi, la seguente Tabella 10 riepiloga i valori limite riferiti alla terna di assi cartesiani con origine nel torace, l'asse z passante per il coccige e la testa, l'asse x passante per la schiena ed il petto e l'asse y passante per le spalle.

Asse di riferimento	Frequenza (Hz)	Valore limite dell'accelerazione
z	1 + 4	$5 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2 + 3 \text{ dB per ottava}$
	4 + 8	$5 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$
	8 + 80	$5 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2 + 6 \text{ dB per ottava}$
x - y	1 + 2	$3,6 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$
	2 + 80	$3,6 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2 + 6 \text{ dB per ottava}$

Tabella 10 - Valori limite dell'accelerazione da non superare per garantire il benessere umano

La Norma ISO indica inoltre i fattori di moltiplicazione da applicare alle curve base dell'accelerazione e delle velocità definite in frequenza (frequenza centrale di banda in terze di ottava), allo scopo di determinare le curve limite al variare del periodo di riferimento (diurno o notturno), del tipo di vibrazione (continue o intermittenti, transitorie), oltre che del tipo di insediamento (ospedale, laboratori di precisione, residenze, uffici ed industrie).

La seguente Tabella 11 illustra i valori numerici dei fattori di moltiplicazione delle curve base, definiti considerando lo stato dell'arte degli studi di settore.

Tipo di edificio	Periodo del giorno	Accelerazione ponderata (mm/s ²)		
		Vibrazioni continue o intermittenti	Vibrazioni transienti e shock ripetitivi	Eventi singoli che ricorrono spesso in un giorno
Zone critiche (ospedali, teatri, etc.)	Giorno	7 + 14	10 + 20	10 + 20
	Notte	7 + 14	10 + 20	10 + 20
Residenziale	Giorno	28 + 56	40 + 80	150 + 300
	Notte	14 + 28	20 + 40	50 + 100
Uffici	Giorno	28 + 56	40 + 80	400 + 800
	Notte	28 + 56	40 + 80	400 + 800
Workshop	Giorno	56 + 120	80 + 200	500 + 1000
	Notte	56 + 120	80 + 200	500 + 1000

Tabella 11 - Fattori di pesatura delle accelerazioni delle curve base

Le vibrazioni devono essere misurate nel punto di ingresso del corpo umano e ne deve essere rilevato il valore RMS di accelerazione perpendicolarmente alla superficie vibrante.

Nel caso di edifici residenziali, nei quali 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 nei tre assi.

4.4.2. Norma UNI 9614

La Norma UNI 9614 definisce il metodo di misura delle vibrazioni, di livello costante o non costante, immesse negli edifici ad opera di sorgenti esterne o interne agli edifici stessi. Essa prescrive la valutazione delle accelerazioni (valore efficace espresso in dB, rispetto ad un'accelerazione di riferimento di 10^{-6} m/s^2) secondo gli usuali tre assi di propagazione (§ seguente Figura 2), ponderate in frequenza secondo le curve riportate nella successiva Figura 3 o, se la misura è effettuata in terzi di ottava, mediante la tabella riportata al paragrafo 4.2 della norma stessa.

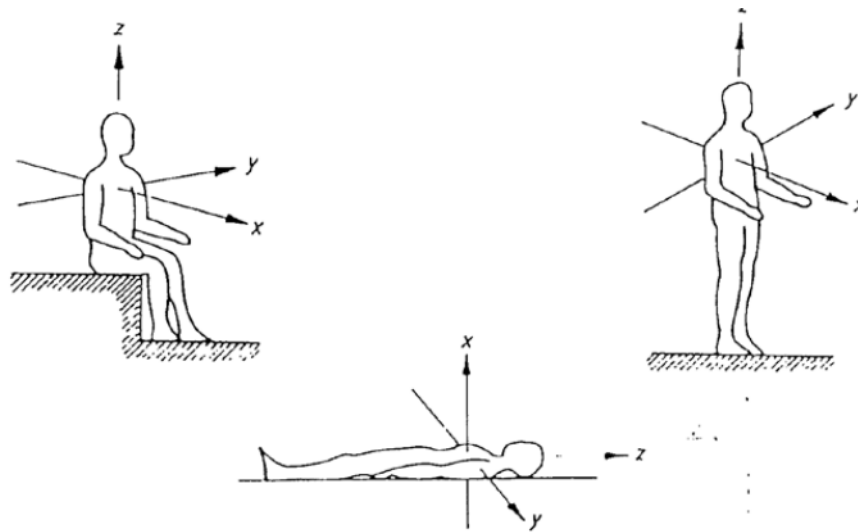


Figura 2 - Assi standard di propagazione delle vibrazioni per le varie posture

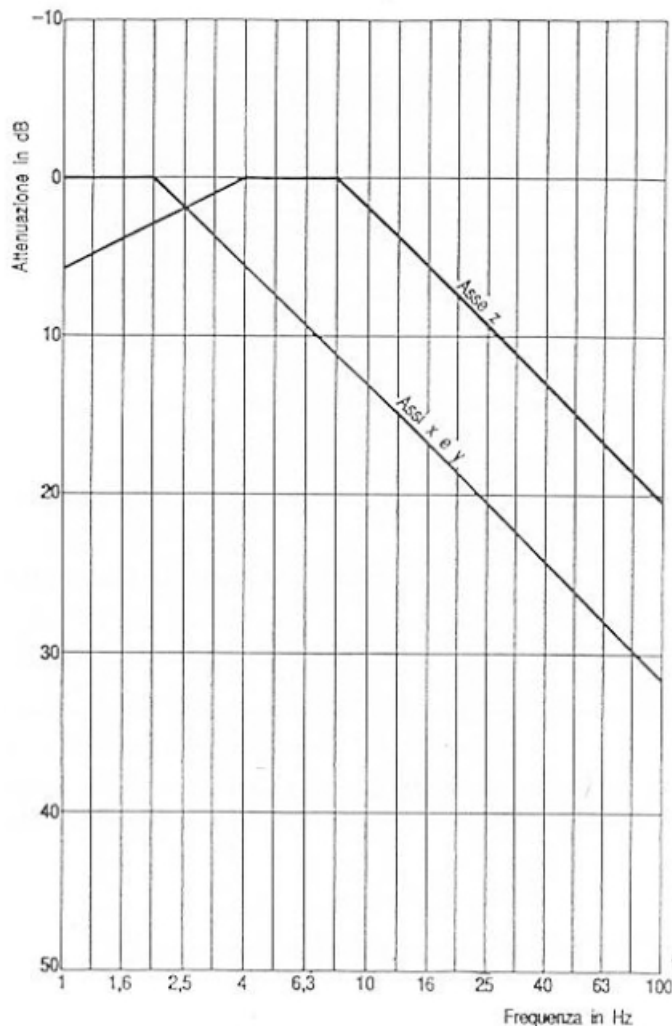


Figura 3 - Curve di ponderazione delle vibrazioni

La norma considera tre diversi fenomeni vibratorii, in funzione della variabilità nel tempo:

➤ si definiscono fenomeni vibratorii di livello costante quei fenomeni i cui livelli di vibrazione, ponderati nel tempo utilizzando una media esponenziale con costante di tempo “Slow”, presentano, durante il periodo di riferimento o di osservazione, una variazione di ampiezza inferiore ai 5 dB

➤ si definiscono vibrazioni impulsive quelle originate da eventi di breve durata e che danno luogo ad un rapido innalzamento del livello di accelerazione sino ad un valore massimo, seguito da un decadimento che può causare una serie di oscillazioni della struttura, che però si estinguono velocemente nel tempo (meno di 2 secondi)

➤ nel caso in cui non si verifica nessuna delle condizioni precedenti, il fenomeno vibratorio è considerato di livello non costante o, in casi specifici, di tipo intermittente

La norma non stabilisce dei criteri per la determinazione della scala temporale di riferimento: si intuisce quindi che uno stesso fenomeno di livello “non costante” potrà essere considerato di breve durata o al contrario di lunga durata o addirittura impulsivo; il tutto dipende dal tempo di riferimento considerato.

Ai fini della valutazione del disturbo, si definiscono inoltre le vibrazioni residue come somma di tutte le vibrazioni di qualunque origine (vibrazioni prodotte da sorgenti diverse da quelle in esame, vibrazioni di fondo, rumore elettrico della catena di misura) con l’esclusione delle vibrazioni dovute alla sorgente esaminata o da esaminare. Si intuisce, in questo caso, che una valutazione del disturbo da vibrazioni arrecate da una particolare sorgente può essere influenzato anche notevolmente dalla presenza delle vibrazioni residue; influenza tanto più importante quanto più le vibrazioni attese, indotte dalla sorgente in esame, sono di lieve entità.

La norma UNI 9614 definisce poi un criterio per valutare l’affidabilità e la qualità delle misure effettuate in relazione alle vibrazioni residue e quindi, indirettamente, la qualità della stima del disturbo. In particolare, definita

$$\Delta L_w = L_{w,t} - L_{w,r}$$

la differenza tra il livello di vibrazione totale (“in esame”) misurato a sorgente attiva ed il livello di vibrazione residua:

- se $\Delta L_w > 10$ dB, non è necessaria alcuna correzione del segnale in quanto trascurabile
- se $6 \text{ dB} < \Delta L_w < 10$ dB, è necessaria la correzione del segnale, ovvero al livello totale deve essere sottratto il livello residuo
- se $\Delta L_w < 6$ dB, è necessaria la correzione del segnale ma, a differenza del caso precedente, le conclusioni e le valutazioni del disturbo sono solo indicative

La correzione del segnale consiste nel sottrarre al livello “totale” il livello residuo:

$$L_{w,c} = 10 \log(10^{L_{w,t}} - 10^{L_{w,r}})$$

dove:

$L_{w,c}$ è il livello di vibrazione corretto

$L_{w,t}$ è il livello di vibrazione totale

$L_{w,r}$ è il livello di vibrazione residuo

I locali o gli edifici vengono classificati in funzione della relativa destinazione d'uso, ovvero aree critiche, abitazioni, uffici o fabbriche. Una diversa sensibilità viene attribuita alle abitazioni nel periodo diurno, definito dalle ore 7.00 alle ore 22.00, e nel periodo notturno, compreso tra le 22.00 e le 7.00 del giorno dopo.

Nell'Appendice 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 riportati nella seguente Tabella 12.

Destinazione d'uso	a [m/s ²]	L [dB]
Asse Z		
Aree critiche	5.0·10 ⁻³	74
Abitazioni (Periodo Notturno)	7.0·10 ⁻³	77
Abitazioni (Periodo Diurno)	10.0·10 ⁻³	80
Uffici	20.0·10 ⁻³	86
Fabbriche	40.0·10 ⁻³	92
Assi X,Y		
Aree critiche	3.6·10 ⁻³	71
Abitazioni (Periodo Notturno)	5.0·10 ⁻³	74
Abitazioni (Periodo Diurno)	7.2·10 ⁻³	77
Uffici	14.4·10 ⁻³	83
Fabbriche	28.8·10 ⁻³	89

Tabella 12 - Limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza di livello costante o non costante, validi per l'asse Z e gli assi X e Y

Qualora i valori o i livelli delle vibrazioni in esame dovessero superare i limiti, le vibrazioni possono essere considerate oggettivamente disturbanti per il soggetto esposto.

Detti limiti sono validi sia per le vibrazioni continue sia per quelle non continue; in quest'ultimo caso però l'accelerazione ponderata equivalente, espressa in unità fisiche o in dB, deve essere misurata/valutata su un intervallo di tempo T, rappresentativo del fenomeno (come già detto in precedenza la norma non lo definisce), e quindi attraverso le seguenti formule:

$$A_{w,eq} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T [a_w(t)]^2 dt \right]^{0.5}$$

$$L_{w,eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{a_w(t)}{a_0} \right]^2 dt \right]$$

dove:

$a_w(t)$ è l'accelerazione ponderata espressa in m/s^2

$L_{w,eq}(t)$ e $A_{w,eq}(t)$ rappresentano i livelli continui equivalenti dell'accelerazione calcolati sul periodo T espressi rispettivamente in dB ed in m/s^2

T è la durata del fenomeno espresso in secondi

a_0 è l'accelerazione di riferimento $10^{-6} m/s^2$

Nel caso invece di vibrazioni di tipo impulsivo, è necessario misurare il livello di picco dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza; tale livello deve essere successivamente diminuito di 3 dB, al fine di stimare il corrispondente livello efficace. Qualora 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 ed alla loro durata, moltiplicandoli per un fattore correttivo F; nessuna riduzione può invece essere applicata per le aree critiche.

Nella seguente Tabella 13, sono indicati i limiti che possono essere adottati se il numero di eventi impulsivi giornalieri non è superiore a 3.

Destinazione d'uso	Asse Z a [m/s^2]	Assi X,Y a [m/s^2]
Aree critiche	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$3.6 \cdot 10^{-3}$
Abitazioni (Periodo Notturno)	$7.0 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$
Abitazioni (Periodo Diurno)	0.30	0.22
Uffici	0.64	0.46
Fabbriche	0.64	0.46

**Tabella 13 - Limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza
validi per le vibrazioni impulsive**

Il campo di frequenza stabilito dalla norma è tra 1 ed 80 Hz, per cui il filtro da applicare, in caso di rilievi sperimentali, deve tagliare la banda del segnale di frequenza superiore agli 80 Hz.

Inoltre, a seconda dell'asse lungo il quale si esegue la misura, bisogna applicare determinati fattori di ponderazione a ciascuna ottava o terzo di ottava, ovvero va applicato un filtro al segnale analogico prelevato dal sensore di misura.

La norma UNI 9614 definisce anche le modalità di scelta dei punti di misura; in particolare, qualora il soggetto esposto si trovi prevalentemente in una posizione determinata, l'accelerometro/punto di valutazione va riferito al pavimento in corrispondenza:

- dei piedi, se il soggetto è eretto
- dei glutei, se il soggetto è seduto
- del ventre, se il soggetto è disteso

Quindi la norma prevede che l'accelerometro usato per la misura, o il punto in cui valutare teoricamente l'accelerazione, deve essere posizionato nella zona in cui il soggetto si trova prevalentemente esposto; se è impossibile valutare a priori tale posizione, la norma prescrive che i rilievi siano effettuati al centro dell'ambiente in esame.

Ai fini della valutazione del disturbo, inoltre, la norma definisce il fattore di cresta come il rapporto tra valore di picco ed il valore efficace (o rms) dell'accelerazione ponderata in frequenza. Il valore efficace di norma dovrebbe essere misurato su un tempo maggiore di un minuto. È consigliato valutare il fattore di cresta in quanto gli effetti delle vibrazioni aventi un fattore di cresta maggiore di 6 possono essere sottostimati dai criteri di valutazione riportati in precedenza.

4.4.3. Norma UNI 9614, aggiornamento al 2017

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

La norma, come già illustrato, riguarda il metodo di misurazione delle vibrazioni immesse negli edifici ad opera di sorgenti interne o esterne agli edifici ed i criteri di valutazione del disturbo delle persone all'interno degli edifici stessi. La nuova versione della norma modifica in modo sostanziale la vecchia, introducendo un approccio innovativo per le modalità di valutazione dei disturbi da vibrazioni, facendo riferimento alla norma ISO 2631.2:2003, per i metodi di misura e valutazione, ed alla norma norvegese NS 8176.E. La norma è applicabile a tutti i fenomeni che possono originare vibrazioni negli edifici, come, ad esempio, traffico su gomma o su rotaia, attività industriali o di specifici macchinari, attività di cantiere, esplosioni, ecc.; non è invece applicabile a vibrazioni derivanti da fenomeni sismici, alla valutazione di danni strutturali, architettonici o "cosmetici" agli edifici, per la quale esistono altre norme di riferimento, all'esame di problematiche connesse all'igiene sul lavoro, o alle attività di manutenzione preventiva/predittiva di

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

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

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

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

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

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

Le postazioni di misura vanno individuate sulla base delle reali condizioni di utilizzo degli ambienti da parte degli abitanti, escludendo quindi eventuali ambienti di servizio (ripostigli, servizi igienici, cantine, solai, corridoi, giardini, vie di accesso, balconi/terrazzi, scale, pianerottoli e ambienti non abitabili secondo le vigenti normative indipendentemente dal loro reale uso). Le misure per la valutazione del disturbo alla persona vanno eseguite, in generale, sui pavimenti o, in subordine, su elementi strutturali che possono essere a diretto contatto con il corpo umano durante la normale attività all'interno

dell'ambiente o su superfici di appoggio per mobili utilizzati per il riposo, ma non su soffitti, controsoffitti, mensole, vetrate, suppellettili, mobili, letti e arredi in generale. Vanno anche evitate posizioni di misura su superfici a scarsa aderenza con le strutture (piastrelle non aderenti al massetto), morbide e/o cedevoli (tappeti, moquette, ecc.) o per le quali l'ampiezza delle vibrazioni può derivare anche da cattivo stato di manutenzione. Ovviamente i punti di misura devono essere individuati nei punti ove si rileva il più elevato dei valori efficaci di accelerazione ponderata $a_w(t)$, ma lontano da eventuali punti singolari. La seguente Figura 4 mostra alcune possibili individuazioni di punti di misura adeguati o non adeguati alle valutazioni oggetto della norma in esame.

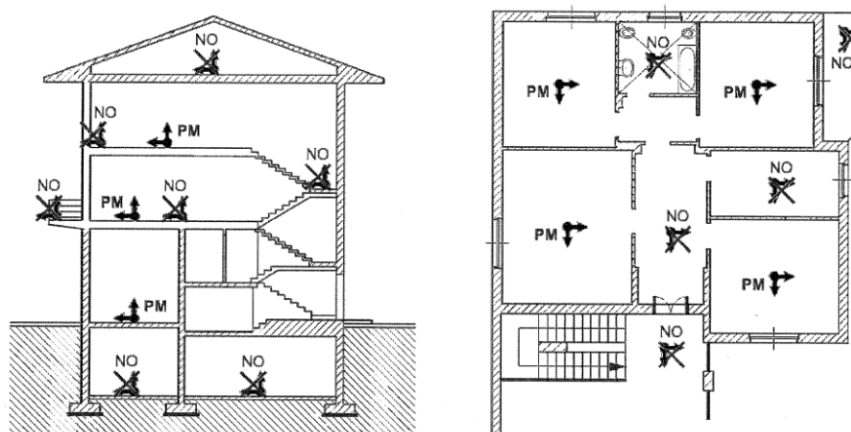


Figura 4 - Individuazione corretta e non corretta dei punti di misura

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

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

- Per fenomeni caratterizzati da un elevato numero di eventi distinti: almeno **15 eventi**
- Per fenomeni generati da attività umane dirette con eventi distinguibili: almeno **25 eventi**

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

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

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

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

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

In particolare, si devono rispettare i seguenti requisiti:

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

Il montaggio degli accelerometri deve essere tale da garantire la trasmissione rigida del moto dal sistema vibrante all'accelerometro almeno della banda 0-500 Hz e deve essere eseguito facendo riferimento alla norma UNI ISO 5348 o secondo le indicazioni fornite dal produttore del sensore. Le modalità di installazione devono essere riportate nel rapporto di misura e devono essere scelte in relazione alle condizioni dei piani di posa, prevedendo eventualmente l'utilizzo, anche contemporaneo, di inserti/tasselli (meccanici o chimici) inseriti nel piano di posa, collaggi rigidi (mastici, resine, cera d'api), magneti, collegamenti bullonati o masse appoggiate isostaticamente sulle superfici alle quali è vincolato l'accelerometro (configurazione non concessa per superfici morbide o irregolari). Il corretto funzionamento della catena di misura deve essere verificato prima e dopo ogni misura mediante apposito calibratore a norma UNI EN ISO 8041-1; sono ammessi calibratori a frequenza fissa pari a 1000 rad/s ed ampiezza di 10m/s^2 . Ogni tre anni l'intera catena di misura deve essere sottoposta a verifica di taratura.

La strumentazione di misura deve infine garantire l'acquisizione del segnale con riferimento alle specifiche di cui al punto 6 della norma UNI 11568:2015.

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

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

1. Filtraggio con filtro passa banda e con filtro di ponderazione: l'accelerazione rilevata sui tre assi $a_x(t)$, $a_y(t)$ e $a_z(t)$ viene preliminarmente filtrata con un filtro passa banda ("band limiting"), con specifiche funzioni di trasferimento (§ punto 8.1.1 della norma), al fine di selezionare le frequenze significative per la risposta del corpo umano al disturbo.

Successivamente si applica un filtro di ponderazione in frequenza che utilizza la curva W_m definita dalla ISO 2631-2, anch'esso con una specifica funzione di trasferimento (§ punto 8.1.2 della norma). Al termine del procedimento di filtraggio si ottiene. Per il j-esimo asse, l'accelerazione ponderata $a_{w,j}(t)$

2. Calcolo del valore efficace dell'accelerazione assiale ponderata: per l'intera storia temporale del segnale ponderato, viene calcolato, secondo quanto indicato dalla norma UNI EN ISO 8041-1:2017 al punto D.1, l'andamento nel tempo del valore efficace dell'accelerazione ponderata, in riferimento a ciascun asse cartesiano, e per un intervallo di integrazione $\tau = 1$ s, secondo la seguente formulazione:

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

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

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

Le precedenti tre fasi di calcolo sono riassunte nella seguente Figura 5.

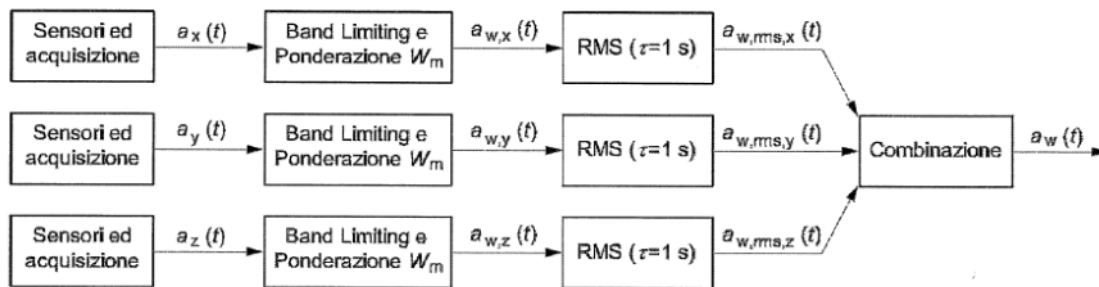


Figura 5 - schema di calcolo dell'accelerazione ponderata efficace secondo la UNI 9614:2017

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

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

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

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

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

dove:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Periodo diurno: 7.2 mm/s^2
- Periodo notturno: 3.6 mm/s^2
- Periodo diurno di giornate festive: 5.4 mm/s^2

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

- Ambienti di lavoro (1) $V_{sor} = 14 \text{ mm/s}^2$
- Ospedali, case di cura ed affini (2) $V_{sor} = 2 \text{ mm/s}^2$
- Asili e case di riposo (3) $V_{sor} = 3.6 \text{ mm/s}^2$
- Scuole (4) $V_{sor} = 5.4 \text{ mm/s}^2$

Note:

(1) limiti indicati fermi restando gli obblighi derivanti dalla protezione dei lavoratori ex D.Lgs. 81/08 e s.m.i, e riferendosi a vibrazioni immesse da sorgenti esterne e non connesse alle attività (le vibrazioni connesse alle attività produttive fanno parte della componente residua V_{res})

(2) limiti validi indipendentemente dall'orario, per degenze ordinarie, e con misure effettuate al pavimento in corrispondenza del letto dei pazienti

(3) limiti validi anche in orario diurno, limitatamente ai periodi effettivamente utilizzati per il riposo diurno (prime ore del pomeriggio)

(4) limiti validi per il periodo di effettivo utilizzo da parte degli allievi e limitatamente alle aule didattiche

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

4.5. Il fenomeno fisico della trasmissione delle vibrazioni

Le vibrazioni rappresentano una forma di energia in grado di provocare disturbo o danni psicofisici all'uomo, oltre che danni sulle cose e sugli animali.

Questi effetti dipendono, in primo luogo, dalle caratteristiche fisiche del fenomeno e, soprattutto, dall'intensità vibratoria, dalla frequenza, dal punto e dalla direzione di applicazione e dalla durata; in secondo luogo, dipendono dalla vulnerabilità specifica degli organismi o delle opere che vengono ad essere investite. Le grandezze utilizzate per la descrizione di uno stato vibratorio sono rappresentate dai seguenti parametri:

- Ampiezza, ossia valore dello spostamento lineare rispetto alla posizione di equilibrio (mm)
- Velocità, con la quale il corpo si sposta rispetto al punto di equilibrio (m/s)
- Accelerazione, alla quale il corpo è sottoposto in relazione alle continue variazioni di velocità (m/s^2)
- Frequenza, ossia il numero delle oscillazioni che un corpo compie nell'unità di tempo (Hz)

Gli effetti delle vibrazioni sull'organismo umano possono essere di tipo biomeccanico, psico-sensoriale e fisiologico.

Gli effetti bio-meccanici dipendono dalle frequenze e possono colpire vari organi ed apparati, in misura tanto più grave quanto più la frequenza si avvicina alla risonanza specifica di ciascuno di essi.

Gli effetti di tipo psico-sensoriale sono regolati da vibro-ricettori cutanei e/o dalle terminazioni nervose libere del derma.

Gli effetti fisiologici si risentono soprattutto sul sistema cardiocircolatorio e sul sistema nervoso centrale, con aumento della pressione arteriosa, della frequenza cardiaca e del consumo di ossigeno, per quanto riguarda il primo; inibizione dei riflessi ed effetti soporiferi per quanto riguarda il secondo.

Le vibrazioni possono inoltre provocare danni agli edifici ed ai manufatti in genere, sia per la loro propagazione alle strutture, attraverso i terreni, sia per gli assestamenti del terreno stesso e, quindi, per eventuali suoi cedimenti. Quest'ultimo effetto è spesso il più pericoloso quando ci si trova in presenza di terreni a bassa densità e, particolarmente, nel caso delle terre sciolte incoerenti, quali sabbie e ghiaie; inoltre, si evidenzia come la presenza di acqua aggravi tale fenomeno.

Poiché gli assestamenti diminuiscono allontanandosi dalla sorgente delle vibrazioni, i cedimenti prodotti lungo una costruzione non sono uniformi e possono quindi portare ad inclinazioni e danni alle sovrastrutture. Tra i vari limiti delle vibrazioni indicati per la

Pag. 35 di 56

prevenzione dei danni alle costruzioni, che sono proposti in funzione dell'ampiezza, il più cautelativo è quello di Edwards e Northwood, con valori della velocità compresi tra 0.025 e 5 cm/s ed ampiezza di vibrazione variabili da 0.025 ad alcuni mm.

4.5.1. Disturbo alle persone

Nelle norme descritte nel precedente capitolo vengono definiti i metodi di misura delle vibrazioni immesse negli edifici ad opera di sorgenti esterne o interne agli edifici stessi, al fine di valutare il disturbo arrecato ai soggetti esposti. Per l'effettuazione della valutazione va adottato un sistema di coordinate riferito all'edificio e non al corpo umano. I rilievi delle vibrazioni verticali, orizzontali e trasversali vanno eseguiti preferibilmente simultaneamente.

A questo proposito, va sottolineato che la sensibilità umana è variabile con la frequenza, e dipende dall'asse cartesiano considerato rispetto al riferimento relativo al corpo umano. Le curve di sensibilità umana sono codificate dalle norme, rispetto ai sistemi di riferimento per persone sdraiate, sedute o in piedi (§ precedente Figura 2). Al fine di rendere equivalente la percezione umana alle varie frequenze, al segnale di accelerazione rilevato si applica poi la ponderazione descritta dalle curve illustrate nella precedente Figura 3.

In genere, tuttavia, il possibile ricettore si troverà esposto indifferentemente su uno dei tre assi, a seconda della sua giacitura, che non è, ovviamente, predeterminata e risulta variabile nel corso delle 24 ore. In tali casi, la Norma UNI 11048 prevede l'impiego di una curva di ponderazione per asse generico (o meglio, per asse non definibile) W_m , la cui definizione matematica è presentata nell'allegato A della ISO 2631/2 2003.

Convenzionalmente, in analogia con le analisi del rumore, sia i valori di velocità che quelli di accelerazione vengono valutati sulla scala dei dB, tramite le seguenti relazioni:

$$L_{acc} = 20 \log \left(\frac{a}{a_0} \right) \qquad L_{vel} = 20 \log \left(\frac{v}{v_0} \right)$$

In tali relazioni compaiono i seguenti valori di riferimento (ISO 1683):

$$a_0 = 0.001 \text{ mm/s}^2$$

$$v_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ mm/s}$$

Nella seguente Tabella 17 sono specificati i valori di ponderazione delle componenti per bande di 1/3 di ottava: i fattori vanno moltiplicati per le componenti dell'accelerazione espresse in mm/s^2 , mentre i guadagni vanno sommati ai livelli delle componenti dell'accelerazione espressi in dB.

Frequenza		W _m		Frequenza		W _m	
Hz	Fattore	Guadagno	Hz	Fattore	Guadagno	Hz	Fattore
1	0.8329	-1.59	10	0.4941	-6.12		
1.25	0.9071	-0.85	12.5	0.4114	-7.71		
1.6	0.9342	-0.59	16	0.3375	-9.44		
2	0.9319	-0.61	20	0.2738	-11.25		
2.5	0.9101	-0.82	25	0.2203	-13.14		
3.15	0.8721	-1.19	31.5	0.176	-15.09		
4	0.8184	-1.74	40	0.1396	-17.10		
5	0.7496	-2.50	50	0.1093	-19.23		
6.3	0.6692	-3.49	63	0.08336	-21.58		
8	0.5819	-4.70	80	0.06036	-24.38		

Tabella 17 - Tabella riepilogativa della ponderazione del filtro W_m

Sia la Norma UNI 9614 che la UNI 11048 prevedono di valutare il livello complessivo di accelerazione ponderata nell'intervallo da 1 ad 80 Hz; se il segnale disturbante è caratterizzato da una emissione concentrata entro una singola banda di 1/3 di ottava, è sufficiente correggere il valore misurato applicando la correzione riportata in tabella (ad esempio essa vale -19.23 dB a 50 Hz).

Se, viceversa, lo spettro è continuo ed esteso a più bande, occorre anzitutto calcolare il livello di accelerazione corretto a ciascuna frequenza; successivamente le componenti ponderate $a_{w,i}$, vanno sommate tra loro in termini quadratici, al fine di ottenere l'accelerazione ponderata in frequenza a_w secondo la relazione:

$$a_w = \sqrt{\sum_i a_{w,i}^2}$$

Se le componenti per bande di 1/3 di ottava sono espresse in dB, ai livelli delle singole componenti $L_{w,i}$ vanno sommati i guadagni indicati nella tabella sopra riportata. Il livello dell'accelerazione ponderata in frequenza L_w è quindi dato da:

$$L_w = 10 \log \sum_i 10^{0.1L_{w,i}}$$

dove ovviamente $L_{w,i}$ sono i livelli equivalenti delle componenti per bande di 1/3 di ottava ponderati in frequenza.

In alternativa, le vibrazioni possono anche essere rilevate direttamente; in questo caso, va però utilizzato uno strumento dotato del filtro di ponderazione combinato W_m, impiegando la costante di tempo slow.

Può essere utile memorizzare la time history di tale valore con elevata frequenza di campionamento, per meglio analizzare il fenomeno e meglio comprendere la sua

propagazione; in tal modo, si ottiene l'accelerazione ponderata in frequenza L_{aw} , oppure il livello dell'accelerazione ponderata in frequenza L_w .

Tali grandezze vanno però rilevate impiegando la costante di tempo slow; inoltre, va considerato il valore massimo raggiunto nel corso della misura. Il metodo descritto, definito dalla Norma ISO 2631-1 del 1997, è denominato "running r.m.s."

Per la valutazione delle vibrazioni, si considera il valore più elevato dei tre valori rilevati sui tre assi, ossia il valore massimo determinato sull'asse dominante (in genere quello verticale). La Norma UNI 11048, per l'appunto, definisce l'asse Z quale asse principale. La stessa Norma non definisce tuttavia limiti di riferimento per l'accettabilità del disturbo all'interno delle abitazioni, per cui bisogna riferirsi ai valori - corrispondenti ad un valore del livello di accelerazione complessiva, ponderata secondo asse generico - contenuti nell'appendice A della Norma UNI 9614 (che però non costituisce originariamente parte integrante della norma).

Come del resto già evidenziato nei precedenti paragrafi, la UNI 9614 definisce limiti di accettabilità diversi per fabbriche, uffici, aree critiche ed edifici residenziali; inoltre, attua una differenziazione per i valori limite delle accelerazioni rilevati rispetto all'asse Z e rispetto agli assi X,Y (questi ultimi più restrittivi rispetto ai primi). In particolare, i valori ed i livelli limite delle accelerazioni ponderate in frequenza secondo assi generici sono: 83 dB per gli uffici e 89 dB per le fabbriche.

Per quanto riguarda le abitazioni, il valore limite risulta essere pari a 74 dB per il periodo notturno. La norma stabilisce inoltre che, per edifici residenziali, nel periodo diurno sono ammissibili livelli di vibrazioni superiori (77 dB anziché 74).

Per le aree critiche è previsto un solo limite, di valore pari a 71 dB.

4.5.2. Effetti delle vibrazioni sugli edifici

Per quanto riguarda le indicazioni relative alla salvaguardia degli edifici, i primi criteri proposti intorno agli anni '60, imponevano le stesse limitazioni valide per il corpo umano in relazione al disturbo alle persone.

Successivamente, a seguito di studi più approfonditi, per merito di Zeller si è definito il danno sulle strutture al variare del parametro "intensità di vibrazione", parametro proporzionale alla potenza trasmessa all'unità di massa durante un quarto di periodo e, in generale, funzione dell'ampiezza A, della frequenza f e dell'accelerazione a, secondo la seguente relazione:

$$\chi = \frac{a^2}{f} = 16\pi^4 A^2 f^3$$

Nella seguente Tabella 18 si riporta la classificazione degli effetti sugli edifici in funzione della classe di vibrazione compilata ad opera dello stesso Zeller.

χ cm ² /s ³	Classe di vibrazione	Effetto sull'edificio
1÷10	Leggere	Nessun pericolo
10÷100	Medie	Nessun pericolo
100÷1000	Efficaci	Danni leggeri, fessure
1000÷10000	Forti	Lesioni ai muri principali
10000÷100000	Molto forti	Possibile crollo

Tabella 18 - Effetti sugli edifici in funzione della classe di vibrazione di Zeller

La normativa tedesca sulle vibrazioni nelle costruzioni - effetti sui manufatti - (DIN 4150) invece, fissa la variabilità dei danni al variare della velocità limite di vibrazione V_{lim} , calcolata in riferimento alle velocità rispetto alle tre differenti direzioni ortogonali:

$$V_{lim} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

Considerando una classificazione di massima, la norma considera le quattro differenti categorie di effetto riportate nella seguente Tabella 19.

Velocità limite (mm/s)	Danno
< 2,5	Nessuno
2,5 ÷ 6	Molto improbabile
6 ÷ 10	Improbabile
> 10	Possibile

Tabella 19 - Categorie di effetti in funzione della velocità come dalla DIN 4150

Inoltre, per un maggior dettaglio, la stessa norma prende in considerazione il valore limite della velocità di vibrazione al variare della frequenza, della tipologia degli edifici e del punto di analisi effettuata (fondazione, pavimento e piano alto), così come riportato nella seguente Tabella 20.

La normativa italiana, con la UNI 9916 del 1991 “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici”, già precedentemente descritta, in effetti ha regolamentato il problema delle vibrazioni, prendendo come riferimento la Norma ISO 4866.

Tipi di strutture	Velocità di vibrazione (in mm/s)			
	Misura alla fondazione			Misura al pavimento dell'ultimo piano
	Campo di frequenza (Hz)			Frequenze diverse
	<10	10 ÷ 50	50 ÷ 100	
Edifici utilizzati per scopi commerciali, edifici industriali e simili	20	20 ÷ 40	40 ÷ 50	40
Edifici residenziali e simili	5	5 ÷ 15	15 ÷ 20	15
Strutture particolarmente sensibili alle vibrazioni, non rientranti nelle categorie precedenti e di grande valore intrinseco	3	3 ÷ 8	8 ÷ 10	8

Tabella 20 - Classificazione in funzione del tipo di struttura come dalla DIN 4150

Negli ultimi anni, il problema delle vibrazioni ha assunto sempre maggior importanza, sia in considerazione della differente tecnologia costruttiva dei fabbricati moderni, sia in relazione alle nuove e differenti fonti generatrici di vibrazioni (attività di cantiere, mine, traffico di diverso tipo, ecc.) ed ha portato lo stesso Ente normativo a revisionare la UNI 9916, ampliando e dettagliando meglio le singole questioni. Anche in questo caso, la norma di riferimento assunta come modello è sempre la ISO 4866 – seconda edizione.

Tale norma, oltre a definire le caratteristiche generali del fenomeno e la metodologia per la loro misura, in appendice riporta alcune norme di altri Enti normativi, allo scopo di individuare dei valori di riferimento. Essa considera che le caratteristiche dei fenomeni vibratorii che possono interessare un edificio variano in funzione della natura della sorgente di eccitazione e delle caratteristiche dinamiche dell'edificio stesso. Per una corretta esecuzione delle misurazioni, la premessa necessaria per giungere a descrivere completamente il fenomeno, e quindi valutare la possibilità che esso produca danni, è necessario tenere conto dei seguenti fattori:

- meccanismo di eccitazione e trasmissione
- durata del fenomeno
- natura deterministica o aleatoria del fenomeno
- distribuzione spettrale dell'energia

Nel caso più generale, la risposta di un edificio o dei suoi elementi strutturali sottoposti ad eccitazione dinamica e, conseguentemente, il danno potenziale che questa può produrre, dipendono oltre che dal contenuto spettrale dell'eccitazione stessa, anche dalle caratteristiche dinamiche dell'edificio. Pertanto, sarebbe necessario ottenere una documentazione completa sull'edificio, prima di dare una valutazione del rischio di danno

connesso con il fenomeno vibratorio in esame. In particolare, l'attenzione dovrebbe essere concentrata sui seguenti aspetti:

- caratteristiche costruttive dell'edificio
- stato di conservazione
- caratteristiche delle fondazioni ed interazione con il terreno

Tuttavia, in relazione agli obiettivi dell'indagine, lo studio della risposta degli edifici può essere affrontato in maniera più o meno approfondita e quindi il livello di dettaglio della conoscenza degli aspetti sopra elencati può essere più o meno accurato. Pur non influenzando in maniera sostanziale sulla risposta alle vibrazioni, lo stato di conservazione dell'edificio può tuttavia essere di notevole influenza sull'entità del danno che queste possono provocare.

4.6. Cenni sulle tipologie di modelli di previsione delle vibrazioni

Esistono diversi modelli di propagazione delle onde e, conseguentemente, di previsione del livello vibratorio in un dato punto posto ad una prefissata distanza nota dalla sorgente che, pertanto, risulta caratterizzata o per via analitica o per via sperimentale. Lo sviluppo di modelli previsionali ha focalizzato l'attenzione particolarmente sul fenomeno della propagazione delle vibrazioni, individuando gli aspetti che caratterizzano la risposta dinamica del sottosuolo.

In letteratura esistono modelli di previsione analitici, numerici ed ibridi, ovvero basati anche su rilievi sperimentali: il problema principale, infatti, è determinare la funzione di trasferimento del sottosuolo ed in particolare del percorso di propagazione delle onde. I metodi analitici, in genere, si basano su ipotesi semplificative – a meno di non descrivere in modo completo le equazioni costitutive dei materiali – e presentano il vantaggio di poter essere applicati con maggiore flessibilità, condizione assolutamente fondamentale in uno studio previsionale. I metodi numerici – principalmente Elementi Finiti (FEM) e/o metodi di elementi al contorno (BEM) – consentono invece uno studio più dettagliato, ma presentano il grande svantaggio nella complessità della generazione del modello (geometrico e fisico, si pensi alla generazione del modello tridimensionale di un tracciato stradale e del terreno circostante) per ciascun caso; inoltre il rigore di tali metodi può essere solo apparente: spesso infatti non sono noti, con altrettanto rigore, tutti i dati caratteristici del problema.

In generale, i modelli analitici si possono ricondurre a due fondamentali tecniche di modellazione per la determinazione del livello di vibrazione indotto da una sorgente nota in un punto generico. Entrambi i metodi, piuttosto complessi, si basano tuttavia sulla

trattazione del mezzo continuo supposto omogeneo e sono finalizzati alla determinazione della funzione di trasferimento. Normalmente nella propagazione vibratoria vengono considerate solo le onde di Rayleigh, ipotesi, questa, ragionevole in quanto la maggior parte dell'energia, nel caso di sorgenti poste in superficie, è trasportata per mezzo di tale tipologia di onde. I modelli di tipo analitico vengono spesso utilizzati per la previsione dei fenomeni vibratorii generati da sistemi di trasporto su rotaia.

Esistono poi i modelli semi-empirici, anch'essi generalmente utilizzati, in modo più o meno diffuso, nella determinazione dei livelli vibratorii indotti dal trasporto ferroviario. Secondo questo approccio, il disturbo vibrazionale ai ricettori, valutato in termini spettrali nel dominio delle frequenze, dipende da differenti meccanismi di propagazione e di attenuazione (o di amplificazione) presenti lungo la catena di trasmissione: sorgente del disturbo, infrastruttura di trasporto, tipologia del suolo da attraversare, tipologia strutturale dell'edificio, sensibilità fisiologica dell'uomo, ecc.

La sorgente di vibrazioni può generare sia onde di corpo (compressione e taglio), sia onde di superficie (Rayleigh e Love), in misura differente in relazione al tipo di infrastruttura. Per i differenti meccanismi di propagazione delle onde nel terreno (onde di compressione, di taglio e di superficie) ed in relazione al tipo di sorgente, sono stati individuati specifici valori del coefficiente di attenuazione geometrica.

In definitiva è quindi possibile considerare, nel calcolo analitico o semi-empirico, l'effettiva distribuzione delle velocità caratteristiche del sottosuolo e quindi ottenere una simulazione più realistica.

In presenza di sottosuolo con geometria complessa, o quando si è in presenza di superficie del terreno irregolare, l'assunzione di una propagazione di campi di vibrazione secondo modelli analitici (come quelli descritti in precedenza) può invece non essere accettabile. In casi del genere è quindi possibile seguire un approccio numerico, come ad esempio il metodo ad elementi finiti (FEM) o ad elementi al contorno (BEM). In letteratura sono illustrate diverse applicazioni dei metodi numerici per lo studio di vibrazioni generalmente generate da infrastrutture di trasporto. Normalmente il sottosuolo continuo viene discretizzato in una serie di elementi elementari, rendendo possibile descrivere il campo di spostamenti in tutto il dominio. La discretizzazione del dominio deve essere tale da permettere un'adeguata "risoluzione" della deformata vibrazionale indotta dalla specifica sorgente in ogni istante.

Maggiore sarà il numero di elementi, più precisa sarà la rappresentazione, ma, per contro, i tempi di calcolo possono crescere rapidamente con l'aumentare dei gradi di libertà del sistema. In generale la definizione della dimensione spaziale d di un generico elemento

della mesh in uno specifico materiale deve essere effettuata sulla base della frequenza massima delle componenti significative dello sviluppo in serie di Fourier dell'eccitazione ($\max f$) e della velocità di propagazione nel materiale delle onde in esame (V), come illustrato nella seguente relazione:

$$d \leq \frac{V}{f_{\max} k}$$

con k compreso tra 4 e 10, a seconda del tipo di elemento finito

La dimensione massima dell'elemento in ogni materiale deve essere scelta, dunque, in base ai seguenti passaggi:

1. si calcola, in base alle caratteristiche dei materiali scelti ed alla loro posizione, la minima velocità di propagazione dell'onda prevalente zona per zona nel dominio (ad esempio, per gli elementi in superficie si può considerare quella di Rayleigh, per quelli prossimi ad una sorgente sotterranea quelle di volume, P e S)
2. si definisce il massimo valore $\max f$ della frequenza di interesse (per esempio, dalla Trasformata di Fourier del segnale in ingresso)
3. si calcola, mediante l'equazione di cui sopra, il valore minimo della dimensione dell'elemento per il materiale in studio. Se invece la dimensione degli elementi è fissata pari a d (per esempio, vincolata dal codice di calcolo o dalla geometria del dominio), allora risulteranno ovviamente rappresentate in modo attendibile solo le frequenze tali per cui:

$$f_{\max} \leq \frac{V}{d \cdot k}$$

Alla fine del procedimento di calcolo potrà essere determinato il campo di spostamenti dinamici dei nodi del dominio e, quindi, anche dei livelli vibrazionali al ricettore.

4.7. Studio previsionale vibrazionale

Lo studio previsionale vibrazionale consente una valutazione preventiva dei livelli vibrazionali attesi connessi all'esecuzione di lavorazioni di cantiere potenzialmente impattanti. Effettuata la valutazione, lo studio consente anche di prevenire attraverso l'adozione di misure di mitigazione il disturbo patito dalla popolazione esposta.

Per quanto concerne le attività di cantiere, si osserva che alcune lavorazioni e le relative opere propedeutiche possono risultare talvolta impattanti in quanto alcuni macchinari con il loro movimento sul suolo o per effetto delle azioni meccaniche della lavorazione generano vibrazioni che potrebbero in linea teorica determinare danneggiamenti ai fabbricati

(tipicamente di natura cosmetica) o disturbo alle persone. A tal proposito, tenuto conto che i valori limite per i livelli di esposizione alle vibrazioni della popolazione risultano differenti nel periodo diurno e nel periodo notturno e con limiti più restrittivi nel periodo notturno, assumerà particolare importanza la regolamentazione degli orari di esecuzione delle lavorazioni più impattanti dal punto di vista vibrazionale.

Nel caso di specie le attività di cantiere vengono condotte principalmente al largo della costa, in parte nella posizione di realizzazione della nuova diga foranea ed in parte in corrispondenza dell'opera esistente laddove sono previste parziali demolizioni o innesti tra le porzioni d'opera.

Per quanto riguarda invece i cantieri "terrestri", gli stessi sono ubicati in due sole aree circoscritte e ben definite, rispettivamente denominate A e B in analogia a quanto già fatto in materia di impatto acustico.



Aree di cantiere A (Prà – Voltri) e B (ex Ilva)



Area di cantiere A (Prà – Voltri)



Area di cantiere B (Ex Ilva)

Pur trattandosi di aree di cantiere “terrestri”, le stesse sono collocate in posizioni il cui contesto è di tipo produttivo-industriale in ambito portuale, senza dubbio non particolarmente sensibile all’impatto di tipo vibrazionale potenzialmente connesso alle attività che ivi verranno condotte.

Esiste poi un tema connesso alla viabilità da e per le aree di cantiere costiere.

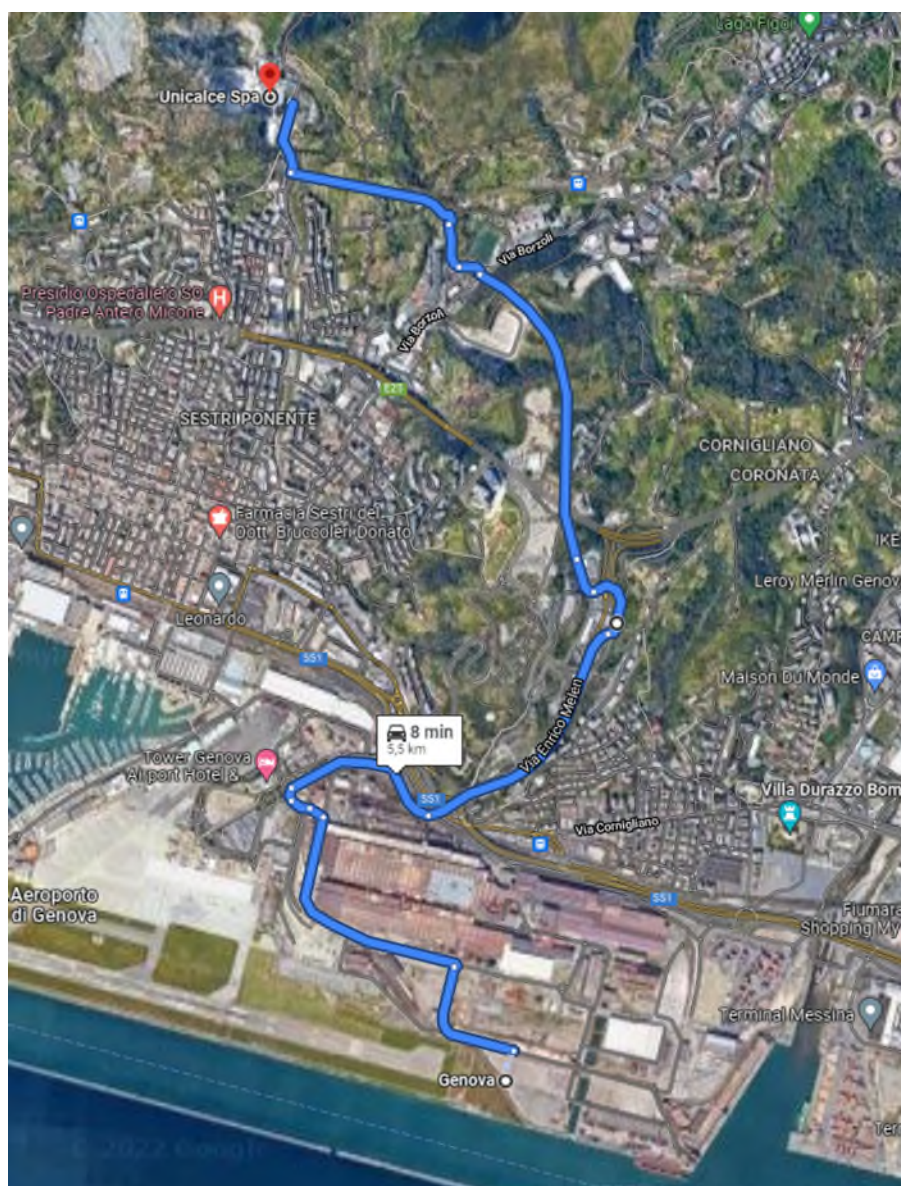
Per quanto concerne l’area di cantiere A (Prà -Voltri) appare ragionevole ipotizzare un convogliamento dei movimenti di mezzi attraverso il vicinissimo casello autostradale di

Genova Prà e da qui, attraverso la percorrenza di un tratto autostradale, raggiungere i siti di destinazione.

Per quanto concerne l'area di cantiere B (Ex Ilva) la situazione offre due ragionevoli possibili alternative: la prima è rappresentata, in analogia al cantiere A, dalla possibilità di fare riferimento al casello autostradale di Genova aeroporto e da qui uscire dalla zona urbanizzata; la seconda è rappresentata dalla percorrenza di una viabilità interna alla città sino a raggiungere la più vicina cava in località Chiaravagna.

L'estratto cartografico di seguito riportato illustra il possibile percorso dei mezzi dall'area di cantiere sino al sito di cava. Il percorso raggiunge comunque l'area del casello autostradale di Genova aeroporto e da qui l'area della cava.

Tutto il percorso si sviluppa in ogni caso all'interno di una viabilità che non attraversa aree densamente popolate ed il cui impatto in termini di disturbo vibrazionale dovrebbe ritenersi in generale molto contenuto.



Percorso tra area di cantiere B (Ex Ilva) e cava in località Chiaravagna

4.7.1. Modalità di esecuzione dello studio previsionale

La valutazione dei livelli di disturbo connessi alla presenza del cantiere o all'esercizio della linea è stata effettuata con l'ausilio di un modello previsionale realizzato internamente su base MathCAD a partire dalle formulazioni analitiche che descrivono la trasmissione delle vibrazioni all'interno di una matrice omogenea raggiungendo poi i fabbricati, a partire da dati di input consistenti negli spettri di emissione alla sorgente del singolo macchinario o attrezzatura.

Per la costruzione dei modelli previsionali si è inoltre fatto riferimento alle trattazioni contenute in articoli specialistici tra i quali si ricordano

- articolo Ing. Pisani dal titolo “Origine, propagazione e modelli previsionali delle vibrazioni dei mezzi di trasporto” (data non disponibile)

- quaderno n. 21 Ciriaf “Modelli delle vibrazioni indotte da treni e veicoli su strada nel terreno” del febbraio 2004

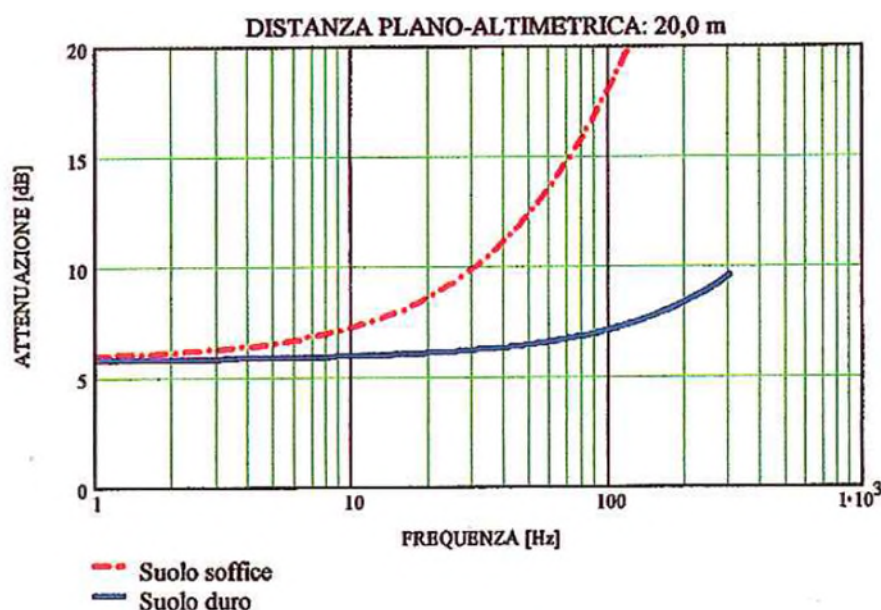
Per le attrezzature di interesse, a partire da dati bibliografici disponibili in archivio o dati di letteratura relativi alle principali attrezzature e mezzi di interesse, si è provveduto a valutare, in funzione della distanza del generico punto ricettore e della tipologia di ricettore esaminato, il livello vibrazionale connesso al transito o all’operatività del mezzo/attrezzatura, definendo in modo parametrico l’impatto finale atteso.

Si osserva che in materia di impatto vibrazionale connesso a lavorazioni di cantiere ricorrenti in letteratura si possono reperire sia spettri sorgente di macchinari che valutazioni previsionali parametriche basate sulla semplice propagazione delle vibrazioni in relazione alla distanza del punto ricettore.

Attenuazione nel terreno

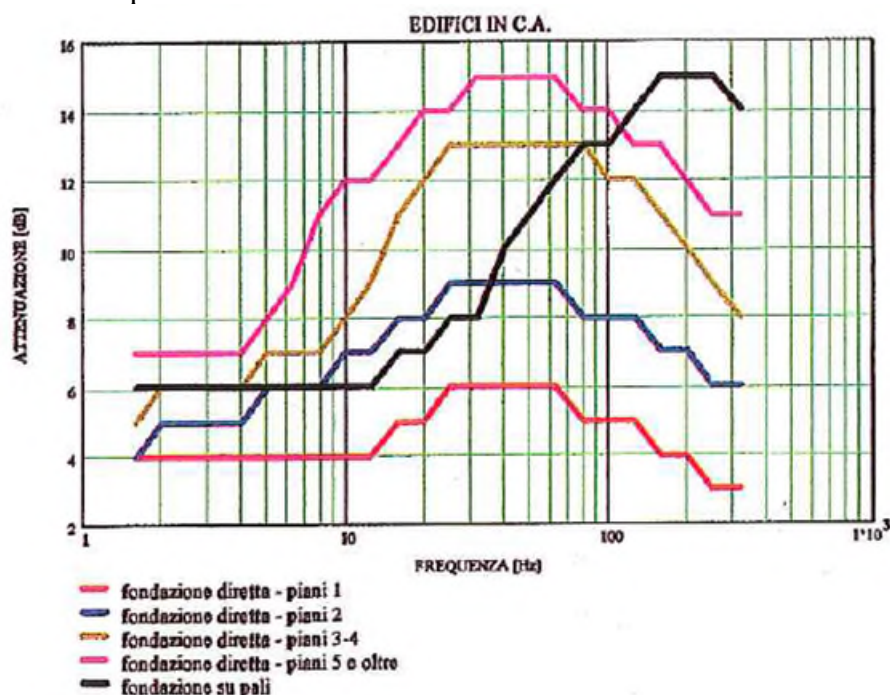
Le formulazioni teoriche utilizzate per la definizione di valori previsionali mostrano in generale una curva di attenuazione incrementale in funzione della frequenza, ancorché di entità variabile in funzione della tipologia di terreno esaminato.

Il grafico sotto riportato illustra il differente comportamento, a parità di geometria e livello sorgente, dell’attenuazione in terreni con parametri geotecnici diversi.



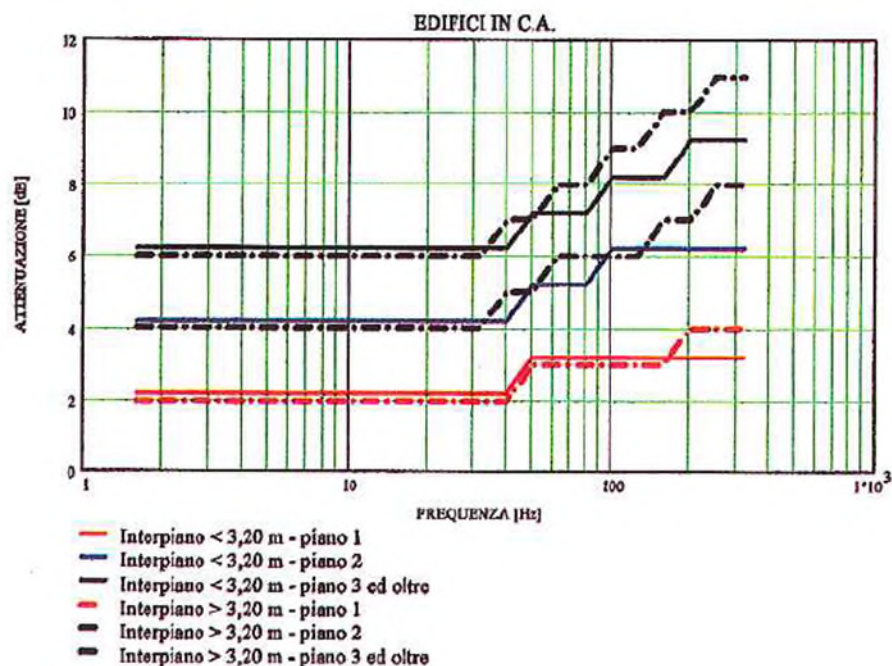
Accoppiamento fondazione - terreno

I valori di attenuazione di letteratura normalmente impiegati per l'effettuazione di studi previsionali (illustrati nel grafico di seguito riportato) presentano i massimi valori di attenuazione in un range di frequenze dell'ordine di 30-70 Hz. Nelle formulazioni analitiche di letteratura non risulta possibile mettere in conto eventuali risonanze locali del terreno in quanto la formulazione delle leggi di attenuazione di letteratura possiede una validità avulsa dallo specifico sito.

Attenuazioni/amplificazioni tra i diversi piani

Di seguito viene riportato il grafico relativo alle amplificazioni di solaio derivante dall'approccio analitico.

Il confronto dei dati sperimentali con le formulazioni analitiche usualmente impiegate (che di norma peraltro non considerano i piani terra ed interrato) evidenzia talvolta per i piani in elevazione attenuazioni un po' inferiori a quelle connesse ad un calcolo previsionale sulla base delle formulazioni di letteratura. Una possibile ragionevole spiegazione potrebbe risiedere nel fatto che i punti di misura ai diversi piani possono risentire in parte anche dell'attività antropica all'interno delle unità immobiliari, rispetto alla quale non è possibile formulare considerazioni tenuto conto che, anche qualora presente, non risulta solitamente monitorabile.



4.7.2. Risultati della modellazione

La modellazione previsionale condotta con la formulazione analitica ha consentito di valutare l'entità dei livelli vibrazionali attesi conseguenti alle attività di cantiere ed ai transiti di mezzi lungo la viabilità precedentemente descritta.

La valutazione è stata condotta sia in ordine alla possibile insorgenza di danni ai fabbricati (anche di tipo cosmetico), sia in ordine al possibile disturbo alle persone. I due aspetti sono infatti regolati da due differenti norme tecniche:

- UNI 9916:2014: “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici”
- UNI 9614:2017: “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo”

Occorre evidenziare che la valutazione dell'insorgenza di danni ai fabbricati ha limiti di riferimento indipendenti dal periodo diurno o notturno, feriale o festivo, ma dipendenti esclusivamente dalla tipologia di fabbricato in esame.

Al contrario i limiti per la valutazione del disturbo alle persone risultano dipendenti dalla destinazione d'uso del fabbricato, ma anche dal periodo di riferimento e dalle giornate feriali o festive.

Poiché sia le lavorazioni di cantiere che i transiti dei mezzi avverranno per lungo periodo e, nelle more di ulteriori precisazioni, potrebbero interessare tutte le fasce temporali, i risultati ottenuti vengono confrontati con i limiti più restrittivi.

In occasioni di future possibili analisi previsionali di maggiore dettaglio si potrà tenere conto sia dell'effettiva distribuzione temporale degli eventi (attività di cantiere o transiti) sia delle caratteristiche costruttive dei fabbricati e della loro destinazione d'uso.

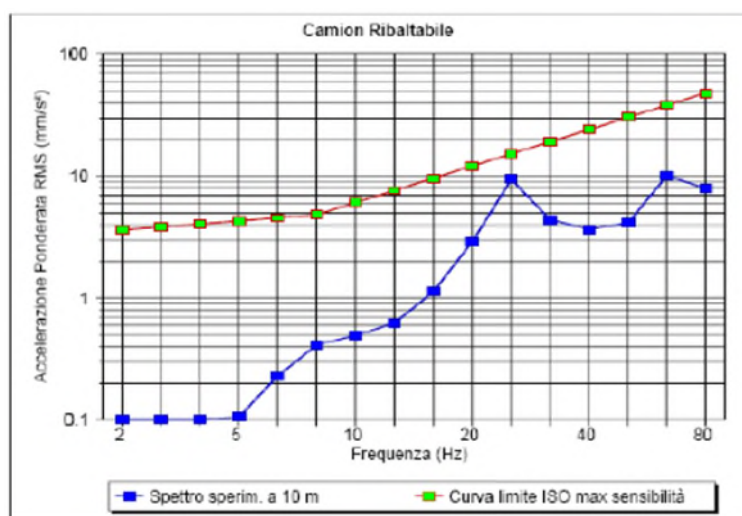
Al fine di quantificare le emissioni di vibrazioni generate dalle macchine impiegate nel cantiere si fa riferimento a dati disponibili in bibliografia; specificatamente tali dati sono stati reperiti da L.H. Watkins – “Environmental impact of roads and traffic” - Appl. Science Publ. (L.H. Watkins, 1990), che riporta una serie di dati sperimentali sull'emissione di vibrazioni da parte di svariati tipi di macchine da cantiere e, in particolare, per la realizzazione delle opere civili e per le fasi di demolizione.

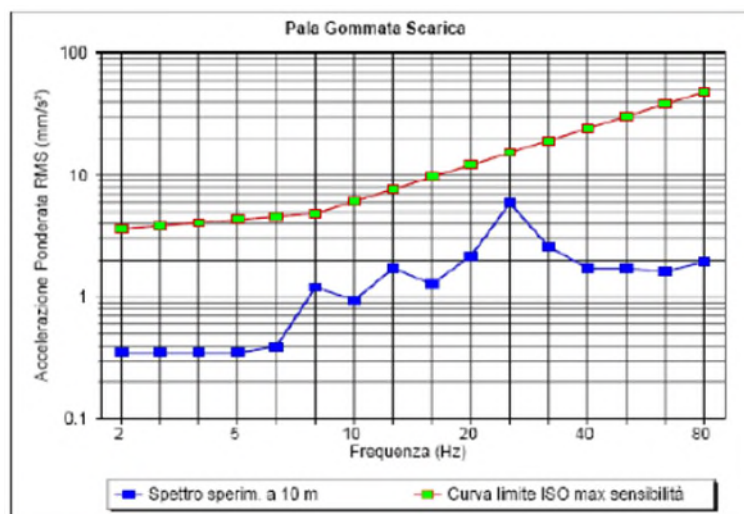
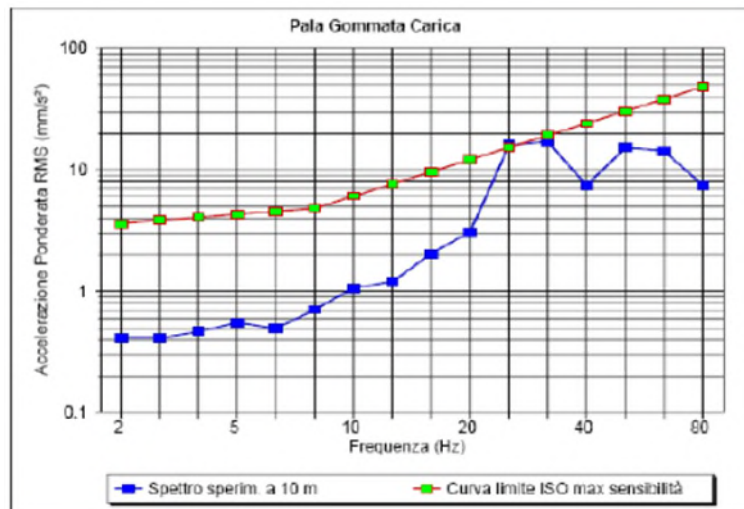
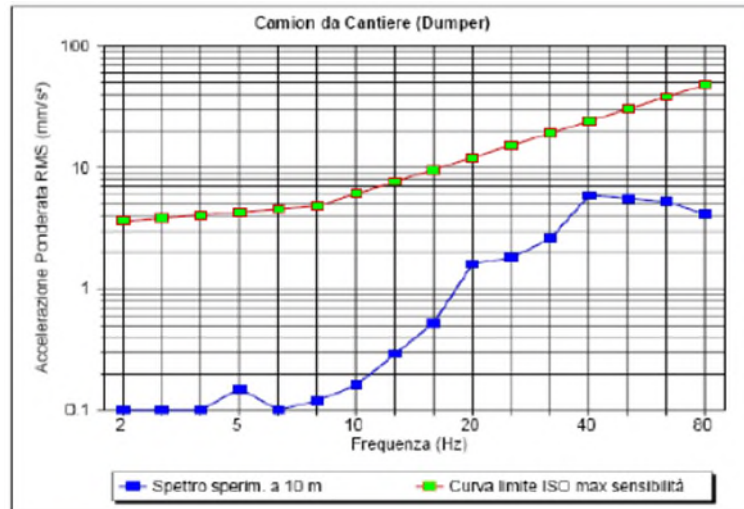
Dalla stessa raccolta si possono ricavare anche i dati spettrali di emissione vibrazionale riportati nella seguente tabella ed illustrati nella successiva figura in riferimento alle varie macchine operatrici. Nella rappresentazione grafica degli spettri viene anche riportata la curva limite di percettibilità secondo UNI 9614.

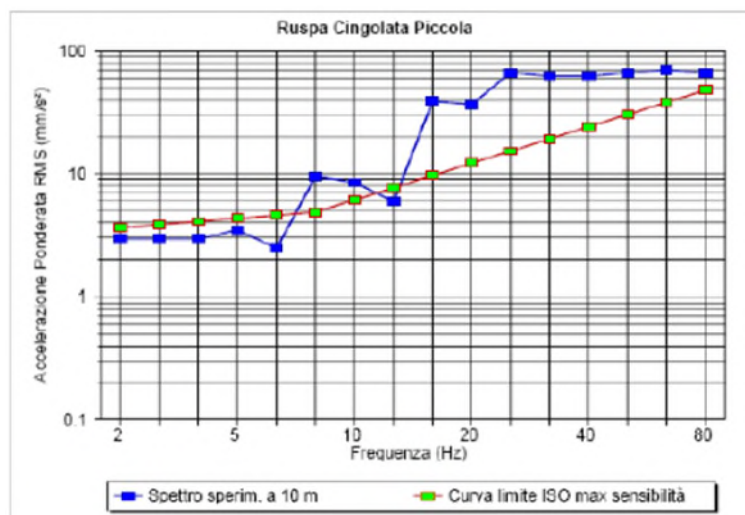
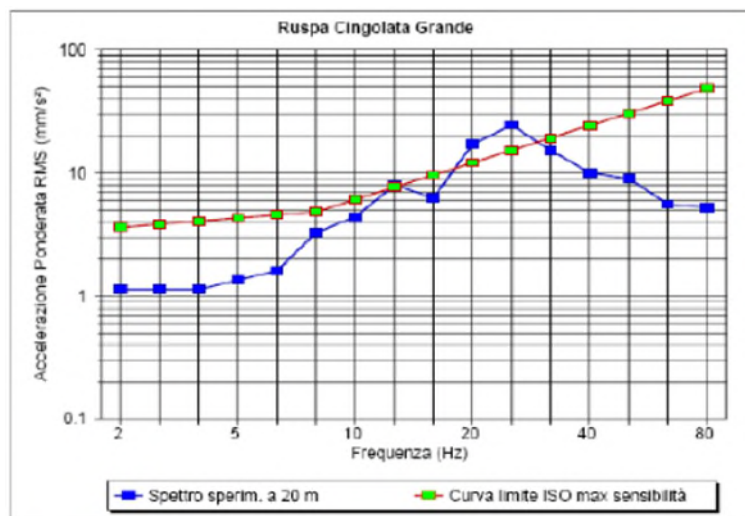
Macchina/Attrezzatura	Distanza	1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80
Camion da cantiere	10	0	0	0	0	0	0	0	0.15	0	0.12	0.15	0.29	0.5	1.67	1.85	2.5	6	5.5	5.2	4
Camion ribaltabile	10	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0.23	0.41	0.5	0.6	1.1	2.99	9	3.9	3.3	4	10	8
Rullo compattatore vibrante	10	0	0	0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.8	0.7	0.8	1.1	1	2	1.55	6	29	3	1	1.6	2
Rullo compattatore (non vibrante)	10	0	0	0	1.6	1.7	2	0.85	5.8	11	18	20	40	20	4	12	7	3.7	3.7	5	4
Pala gommata carica	10	0	0	0	0.41	0.41	0.41	0.48	0.52	0.50	0.76	1.10	1.25	2	3	17	17	7.8	15	14	7.8
Pala gommata scarica	20	0	0	0	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.4	1.2	0.9	1.75	1.26	2	5.2	2.6	1.6	1.6	1.5	2
Ruspa cingolata piccola	10	0	0	0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.4	1.6	3.2	4.2	8	6	18	24	16	10	9	6	5.5

Tabella spettri di accelerazione in mm/s^2 (L.H. Watkins, 1990)

Si riportano di seguito gli spettri sperimentali di alcuni macchinari di interesse utilizzati presso i siti oggetto di verifica.







Di seguito vengono riassunte le risultanze dei calcoli previsionali con riferimento alle due grandezze di interesse.

Gli scenari esaminati sono:

- Scenario produzione cassoni prefabbricati e frantumazione e stoccaggio materiale di demolizione
- Scenario frantumazione e stoccaggio materiale di demolizione
- Scenario movimentazione mezzi da e per le cave

Con riferimento alle lavorazioni significative dal punto di vista dell'impatto vibrazionale, è possibile stimare il livello di vibrazione immesso in un generico edificio in funzione della distanza della fondazione dalla sorgente, considerando cautelativamente valori minimi di perdita di accoppiamento terreno-fondazione (edifici in c.a.). Il livello di

accelerazione stimato ponderato per posture generiche e non note a priori, può poi essere confrontato con il limite di disturbo indicato dalla normativa di riferimento UNI 9614.

Tenuto conto del fatto che i primi recettori che possono essere considerati potenzialmente esposti a fenomeni vibrazionali indotti dal cantiere, sono localizzati a distanze dal perimetro dell'area di cantiere dell'ordine di 140-150 m, appare quindi immediato verificare con sufficiente confidenza che per tali recettori sia scongiurato il rischio del verificarsi di fenomeni di disturbo alle persone o di danno strutturale/estetico, indotto dalle attività di realizzazione delle opere civili e di demolizione previste, fasi, queste, giudicate maggiormente impattanti dal punto di vista delle vibrazioni.

Le fasi di demolizione e di stoccaggio/movimentazione dei materiali di risulta si svolgeranno inoltre in aree ancora più lontane dai recettori, con effettive distanze dell'ordine di più di 200 m. In questo caso la propagazione di possibili fenomeni vibrazionali appare ancora più attenuata, mettendo i recettori ancora più al riparo da possibili fenomeni di disturbo alle persone e/o di danno strutturale/estetico.

Infine, per quanto riguarda i fenomeni di potenziale impatto da vibrazioni generate dal traffico indotto da e per l'area di cantiere, anche in questo caso possono essere scongiurati possibili fenomeni di disturbo alle persone e/o di danno strutturale/estetico agli edifici. Infatti, le vie di accesso al cantiere precedentemente definite, che saranno utilizzate dai mezzi pesanti in entrata ed in uscita dallo stesso, sono caratterizzate dalla limitatissima presenza di ricettori sensibili a distanza ridotta dall'arteria stradale. Numerosi studi hanno mostrato che il passaggio di autocarri ed autoarticolati pesanti a 70 km/h, lungo strade non particolarmente dissestate, non produce significative alterazioni del clima vibrazionale già a partire da circa 15 m di distanza dalla traiettoria di transito; a velocità inferiori, la distanza a cui si potrebbe verificare un potenziale significativo impatto aumenta ulteriormente.

La valutazione degli effetti dell'impatto vibrazionale atteso in corrispondenza del ricettore più prossimo, condotta con riferimento agli scenari sopra descritti, mostra in ogni caso quanto segue:

Scenario produzione cassoni prefabbricati e frantumazione e stoccaggio materiale di demolizione

Velocità di vibrazione per vibrazioni durature: 1.07 mm/s

Massima accelerazione ponderata V_{sof} : 2.75 mm/s²

Scenario frantumazione e stoccaggio materiale di demolizione

Velocità di vibrazione per vibrazioni durature: 1.05 mm/s

Massima accelerazione ponderata V_{sof} : 2.60 mm/s²

Scenario movimentazione mezzi da e per le cave

Velocità di vibrazione per vibrazioni durature: 1.25 mm/s

Massima accelerazione ponderata V_{sof} : 3.3 mm/s²

4.7.3. Considerazioni conclusive

Lo studio ha consentito una preventiva valutazione dei livelli vibrazionali attesi in fase di cantiere. I calcoli di cui alla precedente sintesi consentono di osservare, con riferimento ai due principali temi relativi alla possibile insorgenza di danni ai fabbricati e di disturbo alle persone, quanto di seguito descritto.

Per quanto riguarda la possibile insorgenza di danni ai fabbricati:

- le lavorazioni di produzione cassoni prefabbricati e frantumazione e stoccaggio materiale di demolizione o di sola frantumazione e stoccaggio del materiale di demolizione, determinano livelli vibrazionali indotti in generale compatibili con i limiti normativi anche nel caso di strutture appartenenti alla classe 3 della norma corrispondenti alle strutture più sensibili (monumenti, edifici storici, ecc.). Per fabbricati di particolare interesse o pregio dovrebbe essere condotta una valutazione di maggiore dettaglio una volta note le modalità operative secondo quanto previsto dal progetto esecutivo, anche tenendo conto di eventuali peculiarità introdotte dall'Appaltatore con riferimento alle proprie modalità di esecuzione delle lavorazioni
- la movimentazione di mezzi da e per le cave o verso le aree di cantiere consente di osservare che possono ragionevolmente essere scongiurati possibili fenomeni di danno strutturale/estetico agli edifici. Infatti, le vie di accesso al cantiere precedentemente definite, che saranno utilizzate dai mezzi pesanti in entrata ed in uscita dallo stesso, sono caratterizzate dalla limitatissima presenza di ricettori sensibili a distanza ridotta dall'arteria stradale. Numerosi studi hanno mostrato che il passaggio di autocarri ed autoarticolati pesanti a 70 km/h, lungo strade non particolarmente dissestate, non produce significative alterazioni del clima vibrazionale già a partire da circa 15 m di distanza dalla traiettoria di transito; a velocità inferiori, la distanza a cui si potrebbe verificare un potenziale significativo impatto aumenta ulteriormente.

Per quanto riguarda il disturbo alle persone:

- le lavorazioni di produzione cassoni prefabbricati e frantumazione e stoccaggio materiale di demolizione o di sola frantumazione e stoccaggio del materiale di demolizione, determinano per tutte le tipologie di ricettore livelli vibrazionali indotti in generale compatibili con i limiti normativi con riferimento, anche per lavorazioni condotte in periodi festivi o notturni. Non essendo possibile attivare misure rimediali dirette, l'intervento per mitigare eventuali superamenti dei limiti se dovessero verificarsi, potrebbe consistere nella limitazione temporale delle lavorazioni impattanti e nell'adozione da parte dell'Appaltatore di una politica "buy quiet" che preveda una specifica attenzione alla scelta di macchinari ed attrezzature a basso impatto vibrazionale.
- la movimentazione di mezzi da e per le cave o verso le aree di cantiere consente di osservare che possono ragionevolmente essere scongiurati possibili fenomeni di disturbo alle persone. Infatti, le vie di accesso al cantiere precedentemente definite, che saranno utilizzate dai mezzi pesanti in entrata ed in uscita dallo stesso, sono caratterizzate dalla limitatissima presenza di ricettori sensibili a distanza ridotta dall'arteria stradale. Numerosi studi hanno mostrato che il passaggio di autocarri ed autoarticolati pesanti a 70 km/h, lungo strade non particolarmente dissestate, non produce significative alterazioni del clima vibrazionale già a partire da circa 15 m di distanza dalla traiettoria di transito; a velocità inferiori, la distanza a cui si potrebbe verificare un potenziale significativo impatto aumenta ulteriormente.