

# VALUTAZIONE DEI LIVELLI DI VIBRAZIONI IN EDIFICI RESIDENZIALI

*Normativa, tecniche di misura e di calcolo*

*di Angelo Farina*

*Università degli Studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria Industriale*

## **Sommario**

Questo articolo affronta il problema della valutazione degli effetti disturbanti delle vibrazioni in edifici residenziali.

Normalmente infatti le principali fonti di vibrazioni presenti nel territorio (traffico stradale, ferroviario tram, metropolitane, macchinari industriali) danno luogo a livelli di vibrazioni sufficientemente elevati da indurre disturbo sulle persone, ma assolutamente non in grado di innescare danni permanenti alle strutture, come verrà meglio chiarito nel seguito.

Recentemente è stata emanato un decreto che stabilisce limiti precisi ai livelli di vibrazioni tollerabili sul luogo di lavoro (DLGS 187 del 19/98/2005), mentre non esiste ancora alcuna disposizione di legge che fissi analoghi limiti in ambiente abitativo; ed ovviamente i limiti previsti per l'ambiente di lavoro non sono sufficientemente restrittivi onde garantire la protezione ed il confort nella case.

Sorge quindi l'esigenza di raccogliere in un testo di chiara comprensione e facile applicazione lo stato attuale della tecnica riguardo il problema della valutazione del disturbo da vibrazioni, con riferimento alle norme UNI

esistenti, alle tecniche di misura disponibili ed utilizzabili per le attività di verifica sperimentale, ed alle tecniche di calcolo revisionale che possono essere impiegate in sede di valutazione preliminare di impatto da vibrazioni di nuove infrastrutture di trasporto o di installazioni industriali.

## **Norme tecniche**

La Commissione Vibrazioni dell'UNI ha prodotto una completa serie di norme nazionali, che, sebbene con qualche punto di scarsa chiarezza, coprono l'intera problematica delle vibrazioni negli edifici: valutazione del disturbo alle persone, valutazione del possibile danno strutturale, implementazione della metodica di misura.

In particolare, le tre norme che verranno nel seguito analizzate sono:

- Norma UNI 9614:1990 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo"
- Norma UNI 11048:2003 "Vibrazioni meccaniche ed urti - Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo"

- Norma UNI 9916:2004 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici"

Le prime due norme si rivolgono specificamente alla definizione dei criteri di valutazione del disturbo alle persone, mentre la terza norma indica criteri per la misura e la valutazione delle vibrazioni con riferimento ai possibili danni strutturali.

Va subito chiarito che le norme suddette non utilizzano in modo uniforme le definizioni delle grandezze fisiche e le scale numeriche utilizzate per la loro valutazione. Mentre infatti le norme relative al disturbo umano fanno impiego della scala dei dB per esprimere il valore del livello di accelerazione ponderata, viceversa la norma relativa ai danni strutturali fa riferimento a valori di velocità di vibrazione (espressa dunque in m/s anziché in  $m/s^2$ ), lasciati in scala lineare e quindi senza far impiego della conversione logaritmica insita nell'utilizzo della scala dei dB.

Un altro punto di difformità fra i due casi è costituito dall'utilizzo di un valore medio efficace con costante di tempo "slow" per valutare il

livello di vibrazioni riferibile al disturbo alle persone, mentre si fa impiego del valore di picco puntuale della velocità di vibrazione (inteso come modulo del vettore  $o$ , in alcuni casi, come valore massimo delle tre componenti cartesiane dello stesso). Pertanto si tratta di una valutazione “energetica” per il disturbo, ed una valutazione “cinematica” per il danno strutturale.

### Strumentazione

A parte questi punti, comunque, la metodica di analisi è poi in realtà molto simile, ed anche la strumentazione da impiegare è in sostanza sempre la stessa: uno o più accelerometri triassiali, un sistema di acquisizione dati multicanale, un software di elaborazione delle tracce temporali acquisite in grado di operare gli opportuni filtraggi spettrali e, se necessario, l’integrazione nel tempo.

Il sensore è costituito da una terna accelerometrica, quindi in sostanza tre sensori monoassiali disposti secondo un opportuno riferimento cartesiano. E’ possibile impiegare sia un singolo accelerometro triassiale, che tre accelerometri monoassiali fissati ad un supporto cubico, come mostrato nelle seguenti figure:



Fig. 1 - accelerometro triassiale



Fig. 2 – tre accelerometri

L’uso di tre accelerometri ad alta sensibilità è solitamente raccomandato per misure in ambiente abitativo, in cui i livelli da misurare sono bassi, e vengono captati con difficoltà dagli accelerometri triassiali. Questi ultimi sono invece largamente impiegati in ambito industriale e per la misurazione delle vibrazioni mano-braccio sulla impugnatura degli utensili, causa la loro minor sensibilità.

In alcuni casi vengono anche usati misuratori di velocità, anziché di accelerazione, denominati comunemente “geofoni”. Si tratta però di strumenti molto meno precisi e stabili degli accelerometri, per cui il loro utilizzo fornisce misurazioni meno accurate. La seguente figura mostra un geofono triassiale.



Fig. 3 – geofono triassiale

I segnali provenienti dai tre canali del sensore debbono in ogni caso essere digitalizzati. A questo scopo si possono impiegare registratori DAT multicanale, schede di acquisizione dati collegate ad un PC, oppure veri e propri analizzatori portatili. L’uso dei registratori DAT sta scomparendo, sia perchè si tratta di apparecchiature delicate e costose, sia perchè non consentono di visualizzare immediatamente i risultati, che diventano disponibili solo dopo una successiva elaborazione delle registrazioni che viene effettuata successivamente all’acquisizione.

Comunque le tre foto successive mostrano questi tre tipi di sistemi di acquisizione dati.



Fig. 4 – registratore DAT



Fig. 5 – Scheda per PC



Fig. 6 – Analizzatore palmare a 4 canali

La gran parte dei moderni accelerometri incorpora un preamplificatore con tecnologia FET, che viene alimentato tramite una tensione fantasma applicata attraverso lo stesso cavo di segnale (tecnologia ICP). Questi sensori possono pertanto essere collegati direttamente al DAT, alla scheda di acquisizione o all'analizzatore portatile, perchè l'ingresso ICP è ormai lo standard per tutti. Tuttavia, per misure di altissima precisione e con bassissimo rumore di fondo, si preferiscono ancora i più tradizionali accelerometri passivi, nei quali il sensore piezo non è dotato di alcuna preamplificazione. In questo caso occorre inserire, fra l'accelerometro ed il successivo sistema di digitalizzazione del segnale, uno speciale "charge amplifier", in grado di convertire la fluttuazione di carica elettrica del piezo in un normale segnale in tensione.

I "charge amplifier" sono molto costosi, acquistarne tre può voler dire spendere di più che per il resto del sistema. La seguente figura

mostra un moderno "charge amplifier" a 4 canali.



Fig. 7 – "charge amplifier"

### Elaborazione dei dati

Si acquisiscono dunque tre tracce temporali del segnale di accelerazione, riferite a tre assi cartesiani che solitamente sono disposti come segue:

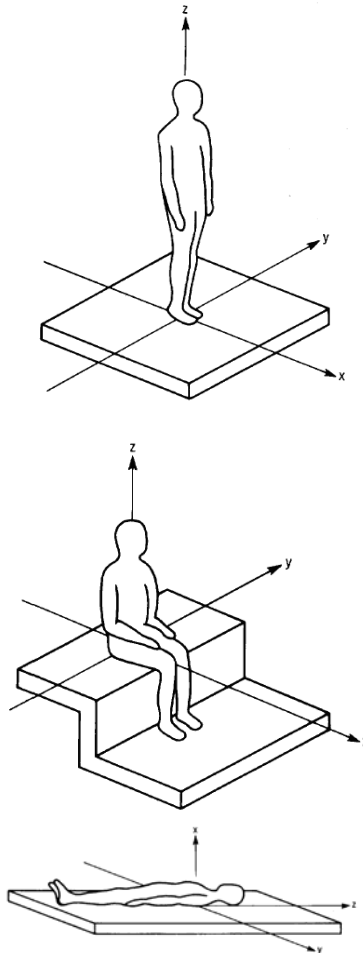


Fig. 8 – riferimento cartesiano

In pratica si usa sempre il riferimento per persona in piedi o seduta, quindi con assi X ed Y orizzontali, ed asse Z

verticale. Secondo la norma UNI 9614, la sensibilità umana alle vibrazioni è diversa lungo i tre assi, e quindi, per ottenere l'accelerazione ponderata, occorrerebbe applicare a ciascuno dei tre segnali un diverso filtraggio, prima di sommarli.

Fortunatamente la successiva norma UNI 11048 chiarisce che, allorché la postura dei residenti non è predefinita o può essere variabile, occorre ponderare tutti tre i segnali con lo stesso filtro di ponderazione "per asse generico". In pratica quindi, per valutare il disturbo sulle persone, si effettua un opportuno filtraggio in frequenza del segnale, applicando un filtro la cui curva di risposta è evidenziata nella seguente figura.

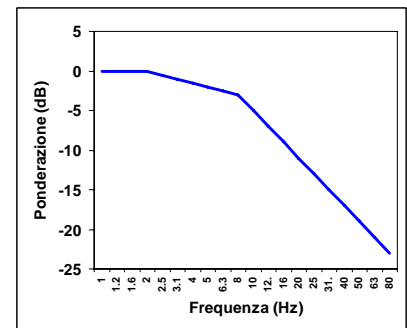


Fig. 9 – curva di ponderazione

Proseguendo con l'analisi del trattamento dei dati al fine della valutazione del disturbo sulle persone, dopo essere stati filtrati, i tre segnali vengono elaborati in modo da determinarne il valore efficace, facendo impiego di un "detector" RMS (Root Mean Square, cioè a valore efficace vero) impostato con una costante di tempo pari ad 1s (tempo di integrazione "slow").

Il calcolo del valore RMS ha un ben preciso significato energetico: infatti il filtraggio “per asse generico” applicato ha sostanzialmente trasformato il segnale di accelerazione in un segnale di velocità (poiché, a partire dagli 8 Hz in su, il filtraggio avviene con una pendenza di 6 dB/ottava, e costituisce dunque un filtro integratore ideale). Ed elevando al quadrato una velocità si ottiene in sostanza una energia cinetica.

Secondo UNI 11048, si deve poi prendere in considerazione il valore di accelerazione ponderata maggiore fra i tre:

$$a_w = \max[a_x, a_y, a_z]$$

Tale valore in realtà cambia nel tempo, e si può quindi costruire un profilo temporale del valore di accelerazione ponderata. Tuttavia, poiché le variazioni possono essere molto rilevanti, il diagramma risulta molto più leggibile utilizzando una scala verticale logaritmica, ed a questo fine si esprime in decibel il valore dell’accelerazione ponderata, secondo la relazione:

$$L_{a_w} = 10 \cdot \log_{10} \left[ \frac{a_w^2}{a_0^2} \right]$$

Nella quale si fa impiego del “valore di riferimento” dell’accelerazione,  $a_0$ , pari a  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}^2$ .

In questo modo, si può visualizzare un profilo temporale del fenomeno studiato, quale ad esempio il transito di un treno o di un veicolo metrotranviario.

La seguente figura mostra ad esempio i profili del passaggio di un treno su un viadotto, rilevati alla base del viadotto stesso e su una trave di un edificio posto a 50m di distanza.

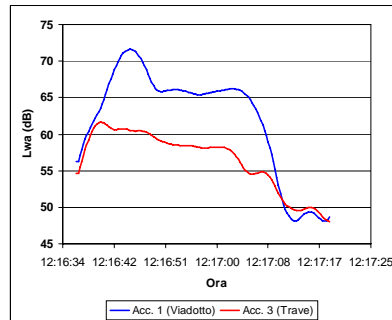


Fig. 10 – profili temporali

Occorre qui segnalare che i valori suddetti, pur essendo espressi in dB, non hanno nulla a che vedere con i livelli sonori. Infatti il dB NON è l’unità di misura del rumore, ma è semplicemente una scala logaritmica, che consente di rappresentare qualsiasi grandezza fisica. Nel caso del rumore, i dB sono definiti a partire dal valore medio efficace della pressione sonora, mentre nel caso delle vibrazioni, i dB sono definiti a partire dal valore medio efficace della accelerazione ponderata.

Non bisogna pertanto lasciarsi spaventare dai valori numerici assunti dai livelli di accelerazione: mentre un livello di pressione sonora di 60 dB rende impossibile dormire in una camera da letto, viceversa un livello di accelerazione ponderata di 60 dB è del tutto inavvertibile. Infatti, la soglia umana di percezione si colloca, secondo la norma UNI 9614, a 71 dB di accelerazione ponderata

(quello che, in acustica è lo “zero dB” della scala dei livelli sonori).

Dal punto di vista della valutazione del disturbo, occorre infine prendere in considerazione, secondo la norma UNI 11048, il valore istantaneo massimo del livello di accelerazione ponderata. Nell’esempio riportato in figura 10, tale valore massimo è pari a circa 72 dB nel punto alla base del viadotto, e a circa 62 dB nel punto sulla trave dell’edificio. In quest’ultimo punto, pertanto, il transito del treno non è sensorialmente avvertibile, in quanto al massimo si raggiunge un livello inferiore di 9 dB alla soglia di percezione.

Comunque, la norma UNI 9614 suggerisce dei valori di livello di accelerazione ponderata che sarebbe opportuno non superare, in funzione del tipo di edificio e della sua destinazione d’uso, come riportato nella seguente tabella.

Edificio	Limite (dB)
Aree critiche	71
Abitazioni (notte)	74
Abitazioni (giorno)	77
Uffici	83
Fabbriche	89

L’ultima riga della tabella è in realtà ormai inapplicabile, a seguito dell’entrata in vigore del decreto legislativo che fissa i limiti di esposizione alle vibrazioni in ambiente di lavoro.

## Danni Strutturali

La valutazione delle vibrazioni in funzione del possibile instaurarsi di danni strutturali viene effettuata invece con una metodica di analisi dei dati sostanzialmente diversa.

Innanzitutto, anziché applicare il filtro di ponderazione “per asse generico”, i tre segnali provenienti dalla terna accelerometrica vengono semplicemente integrati (filtro con pendenza decrescente di 6 dB/ottava) su tutto il range di frequenza, in modo da ottenere un segnale di velocità di vibrazione, anziché di accelerazione.

Apparentemente dunque il segnale che emerge dallo stadio di filtraggio è molto diverso da quello che si utilizza per l'analisi del disturbo; ma in realtà anche il filtro “per asse generico” ha una pendenza decrescente di 6 dB/ottava al di sopra degli 8 Hz. Di conseguenza, se la fonte di vibrazioni non ha contributi significativi sotto gli 8 Hz (come accade molto di frequente, ad esempio nel caso da vibrazioni prodotte da treni, tram, metropolitane, etc.) si può ritenere con ottima approssimazione che il segnale di accelerazione ponderata sia direttamente proporzionale al segnale di velocità.

Volendo dunque ricondursi ad una unica scala di valutazione in dB, facendo gli opportuni calcoli si scopre che fra livelli di accelerazione ponderata (relativo ad un valore della accelerazione di riferimento pari a  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}^2$ ) e livelli di velocità (relativi ad

un valore della velocità di riferimento  $v_0$  pari a  $1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ ) esiste la seguente relazione:

$$L_{a_w} = L_v - 39 \text{ dB}$$

Dopo il filtraggio integratore, si fa poi la somma vettoriale delle tre componenti cartesiane, che fornisce il valore istantaneo della velocità di vibrazione:

$$|v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

Va comunque sottolineato che in questo caso la composizione cartesiana viene fatta sui valori istantanei delle velocità, non sui valori medi efficaci come invece si fa per la valutazione del disturbo alle persone.

Infine si va a memorizzare il valore massimo di picco della forma d'onda, che in genere è significativamente più elevato del valore medio efficace della stessa.

Si definisce infatti come “fattore di cresta” la differenza fra il valore massimo di picco di una forma d'onda ed il suo valore efficace. Per una forma d'onda sinusoidale, il fattore di cresta è pari a 3 dB (o ad un fattore pari a 1.414, volendo usare una scala lineare). Ma per un segnale di tipo “rumore” con forma d'onda molto “aspra”, il fattore di cresta può facilmente essere superiore ai 10 dB, ed in alcuni casi (eventi impulsivi quali martellate, esplosioni, etc.) può superare i 20 dB (quindi un fattore 10 in scala lineare).

La norma UNI 9916, nel suo allegato “D”, fornisce una indicazione sui valori della velocità di picco ammissibile per vari tipi di edifici; tali valori vengono qui riportati, e di ciascuno viene anche indicato il corrispondente valore di accelerazione ponderata in dB, onde poter confrontare questi numeri con quelli della precedente tabella riferita al disturbo alle persone:

### Vibrazioni di breve durata

Edificio	$v_{pk}$ (mm/s)	$L_{aw}$ (dB)
Edifici industriali	20 40	107.0 113.0
Edifici residenziali	5 15	95.0 104.5
Edifici storici	3 8	90.5 99.1

### Vibrazioni permanenti

Edificio	$v_{pk}$ (mm/s)	$L_{aw}$ (dB)
Edifici industriali	10	101.0
Edifici residenziali	5	95.0
Edifici storici	2.5	89.0

Si tratta in generale di valori piuttosto elevati. Anche per gli edifici storici, per i quali si prescrivono i livelli di vibrazione più bassi, la velocità di picco non deve superare i 2.5 mm/s, cui corrisponde un livello di accelerazione ponderata pari a circa 89 dB. Tale limite è dunque generalmente più alto di quello derivante dal non-disturbo alle persone, che, sempre per edifici sensibili, è pari alla soglia di percezione (71 dB). Solo in presenza di un

fattore di cresta molto elevato, maggiore di 18 dB, potrebbe verificarsi il caso di superamento del limite di danno strutturale senza che si verifichi il superamento del limite di disturbo alle persone.

All'autore casi simili non sono mai capitati in una più che ventennale esperienza, per cui si conclude che in sostanza il raggiungimento del rispetto dei limiti di non-disturbo alle persone, descritti nel precedente capitolo, è sicura garanzia anche di non avere effetti dannosi per le strutture edilizie.

E' tuttavia evidente che, qualora i limiti di disturbo vengano significativamente superati, possa altresì verificarsi con buona probabilità anche il superamento dei limiti di danno strutturale, soprattutto in presenza di segnali caratterizzati da un elevato valore del fattore di cresta.

In questi casi può dunque essere opportuno procedere alla verifica di entrambi i limiti, cosa comunque fattibile a partire dalle stesse registrazioni digitali dei segnali provenienti dai sensori.

### Generazione e propagazione delle vibrazioni

In numerosi casi è noto il valore delle vibrazioni emesse ad una breve distanza dalla sorgente delle stesse (binario, macchinario, etc.) e si vuole calcolare, con metodica semplificata, di quanto si attenuerà il livello delle vibrazioni al crescere della distanza dalla fonte.

Cme si vedrà, la legge di propagazione dipende in

generale in modo rilevante dalla frequenza, quindi non ci si può limitare ad una analisi basata sul solo valore complessivo di accelerazione ponderata. Occorre operare il calcolo a ciascuna frequenza, e ricalcolare poi, ad ogni distanza, il livello di accelerazione ponderato complessivo applicando la solita curva di ponderazione.

Occorre quindi conoscere, a breve distanza dalla sorgente, lo spettro in bande di 1/3 d'ottava del livello di vibrazione generato. A titolo di esempio, le seguenti due figure mostrano lo spettro di emissione di un tram e di una macchina movimento terra, entrambe misurate alla distanza di m 5 dal centro della sorgente.

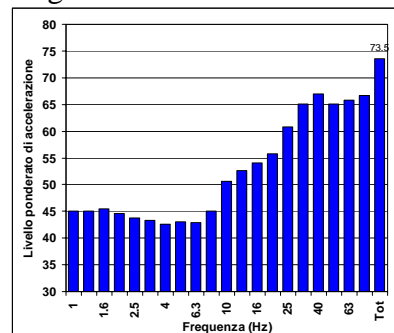


Fig. 11 – spettro vibrazioni tram a 5m dall'asse del binario

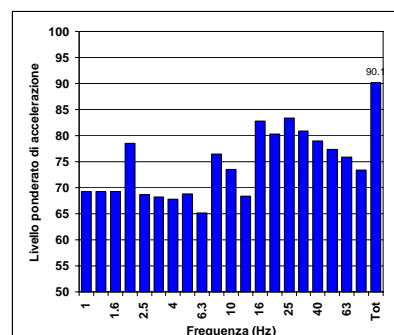


Fig. 12 – spettro vibrazioni ruspa cingolata a 5m

### Attenuazione con la distanza

Si deve distinguere tra tre tipi principali di onde che

trasportano energia vibrazionale [1]:

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

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

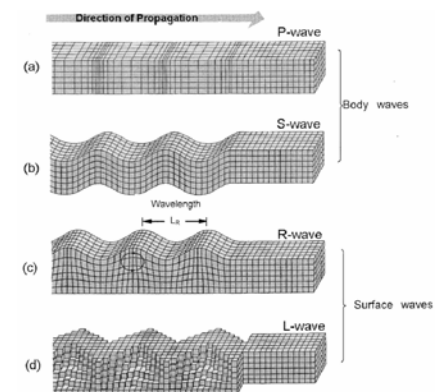


Fig. 13 - Vari tipi di onde di volume e di superficie.

Va anche osservato che il tipo d) (onde L) non viene facilmente eccitato dal transito dei veicoli, in quanto richiederebbe l'imposizione di moti orizzontali alla fonte delle vibrazioni. Nella pratica quindi, si può ritenere che vi sia predominio delle onde di superficie, in particolare di tipo R che corrono sulla interfaccia suolo-aria.

Va inoltre osservato che la velocità di propagazione dei diversi tipi di onde non è la

stessa: le onde di compressione (onde P) sono le più veloci, mentre le onde di taglio e di superficie viaggiano con velocità più basse, in dipendenza del valore del modulo di Poisson del terreno. La seguente figura mostra il rapporto fra velocità di propagazione delle onde P ed R riferito alla velocità di propagazione delle onde di superficie S.

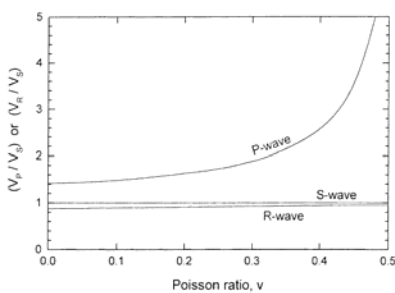


Fig. 14 - Velocità relativa delle onde P ed R rispetto alle onde S

Il modello di propagazione qui impiegato, valido per tutti tre i tipi di onde considerati (P, S, R) è basato sulla seguente formulazione [2]:

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

In cui  $\eta$  è il fattore di perdita del terreno,  $c$  la velocità di propagazione in m/s,  $f$  la frequenza in Hz,  $d$  la distanza in m, e  $d_0$  la distanza di riferimento a cui è noto lo spettro di emissione, qui assunta pari a 5m.

L'esponente  $n$  varia a seconda del tipo di onda e di sorgente di vibrazioni. In particolare, la seguente tabella mostra i valori di  $n$ :

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

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

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

Il termine esponenziale rappresenta invece i fenomeni di dissipazione di energia meccanica in calore, che come si vede va crescendo proporzionalmente alla frequenza. Ciò fa sì che le alte frequenze si estinguano dopo un breve percorso, mentre le frequenze più basse si propagano a distanze maggiori. Il rapporto  $\eta/c$  dipende dal particolare tipo di terreno considerato, ed assume valori elevati nel caso di terreno coltivato soffice, mentre assume valori molto modesti nel caso di pavimentazioni rigide in CLS.

Con riferimento alla propagazione di onde superficiali non si considera il caso di terreni stratificati, o della presenza di disomogeneità di vario genere che possono ostacolare o favorire la propagazione delle vibrazioni.

A titolo illustrativo, la seguente figura mostra l'attenuazione del livello di accelerazione in funzione della

distanza dalla sorgente e della frequenza, avendo ipotizzato un valore di velocità di propagazione  $c$  pari a 400 m/s ed un fattore di smorzamento pari a 0.1. Tali valori sono abbastanza tipici della pianura padana, in zone extraurbane coltivate, per propagazione superficiale.

Dalla figura si può osservare come a bassa frequenza l'attenuazione sia modesta anche a distanze notevoli, mentre a frequenze più elevate a qualche decina di metri di distanza dalla sorgente le attenuazioni sono molto grandi.

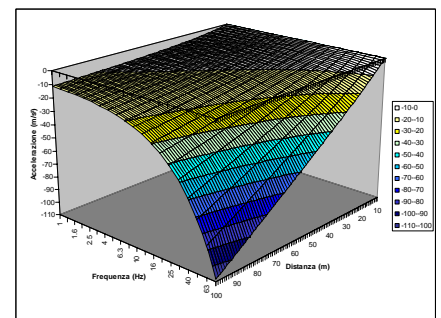


Fig. 15 - Attenuazione in funzione della frequenza e della distanza per onde superficiali.

Nel caso invece di propagazione a partire da sorgente profonda, ipotizzando un terreno ancora omogeneo e con le stesse caratteristiche meccaniche su descritte, si ha una legge di propagazione che mostra una più rapida attenuazione con la distanza, come mostrato dalla seguente figura.

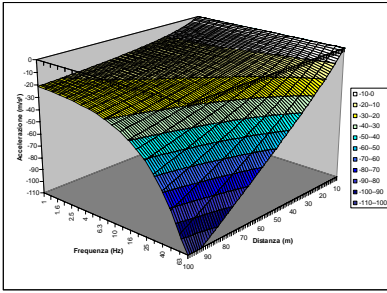


Fig. 16 - Attenuazione in funzione della frequenza e della distanza per onde di volume.

Si supponga ad esempio di calcolare la propagazione della sorgente il cui spettro di emissione a 5m è mostrato in fig. 12 (ruspa cingolata), che avviene mediante propagazione di onde superficiali ( $n=0.5$ ), su un terreno che ha un fattore di smorzamento  $h=0.1$  ed una velocità di propagazione  $c$  pari a 200 m/s. Operando il calcolo con la relazione su riportata, e rivalutando il livello complessivo di accelerazione ponderata a ciascuna distanza, si ottiene la legge di propagazione visibile nella seguente figura:

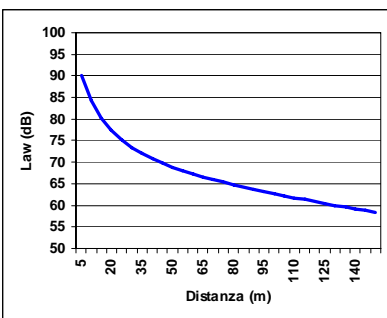


Fig. 17 – Propagazione del livello di accelerazione ponderata – ruspa cingolata

Si deve anche tenere conto che, se nel terreno si hanno superfici di separazione fra strati con diversa impedenza meccanica, una quota di

energia viene riflessa da tali superfici di discontinuità e non viene quindi percepita al di là di esse. In particolare, se l'eccitazione avviene al di sotto dello strato superficiale sovraconsolidato, l'interfaccia fra esso ed il terreno incoerente sottostante riduce l'ampiezza delle vibrazioni che riescono ad attraversare tale interfaccia. Il fattore che esprime tale attenuazione, sempre minore di 1, è legato al rapporto fra le impedenze dei due strati (si rammenta che l'impedenza è data dal prodotto fra la velocità di propagazione delle onde di taglio e la densità del materiale). Esso è espresso dalla seguente relazione:

$$F_r = \frac{1 + \frac{\rho_2 \cdot c_2}{\rho_1 \cdot c_1}}{2}$$

In cui il pedice 1 si riferisce al materiale con impedenza più bassa dei due. Se ad esempio consideriamo l'interfaccia fra uno strato profondo soffice ed incoerente, con densità  $\rho_1$  pari a 1850  $\text{kg/m}^3$  ed una velocità di propagazione delle onde di taglio pari a 150 m/s, ed uno strato superficiale sovraconsolidato, con densità  $\rho_2$  pari a 1900  $\text{kg/m}^3$  e velocità di propagazione pari a 400 m/s, si ha un fattore di attenuazione per riflessione  $F_r$  pari a 0.68, cioè pari a  $-3.3$  dB.

### Attenuazioni / amplificazioni nella struttura degli edifici

Il modello semplificato di propagazione illustrato nel precedente paragrafo si riferisce ai soli fenomeni che avvengono nel terreno,

supposto omogeneo ed isotropo (perlomeno all'interno di ogni strato). In presenza di edifici dalla struttura complessa, collegati al terreno mediante sistemi di fondazione di vario genere, accade che i livelli di accelerazione riscontrabili all'interno degli edifici stessi possono presentare sia attenuazioni, sia amplificazioni rispetto ai livelli sul terreno.

In particolare, diversi sistemi di fondazione producono una attenuazione più o meno pronunciata dei livelli di accelerazione misurabili sulla fondazione stessa rispetto a quelli nel terreno circostante; tale aspetto è legato al fatto che l'interfaccia terreno-struttura non è perfettamente solidale, e pertanto genera fenomeni dissipativi. Detto fenomeno è condizionato dalla tipologia delle fondazioni (a platea, su plinti isolati, su travi rovescie, su pali, etc.) . Nel caso di fondazioni a platea la grande area di contatto con il terreno determina una perdita di accoppiamento praticamente di 0 dB alle basse frequenze, sino alla frequenza di risonanza della fondazione.

Per le altre tipologie di fondazioni possono essere utilizzate curve empiriche che consentono la stima dei livelli di vibrazione della fondazione in funzione dei livelli di vibrazione del terreno.

Va inoltre preso in esame il fenomeno della risonanza strutturale di elementi dei fabbricati, in particolare dei solai: allorché la frequenza di eccitazione coincide con la



frequenza naturale di oscillazione libera della struttura, la stessa manifesta un rilevante aumento dei livelli di vibrazione rispetto a quelli presenti alla base della stessa.

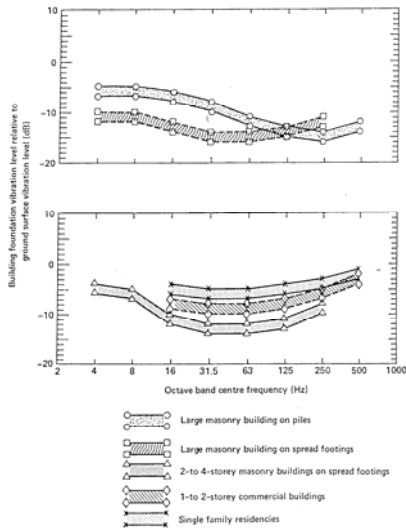


Fig. 18 - Attenuazione dovuta a diversi tipi di fondazione

Nella figura successiva viene evidenziato il possibile campo di amplificazione delle vibrazioni dovuto alla risonanza dei solai, che come si nota oscilla fra 5 e 12 dB nel campo di frequenze rilevanti dal punto di vista ferroviario.

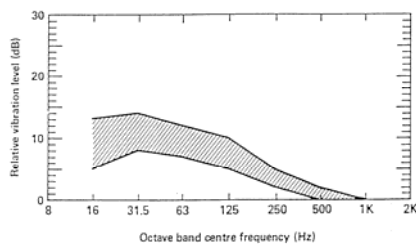


Fig. 18 - Amplificazione prodotta dai solai

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

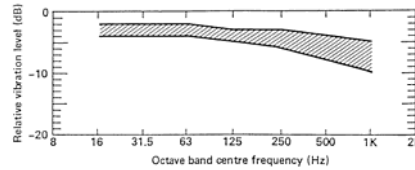


Fig. 19 - Attenuazione da un piano al successivo

Una analisi dei dati disponibili in bibliografia mostra che:

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

Le misure di Ishii e Tachibana mostrano una attenuazione interpiano che varia progressivamente da 3 dB ai piani bassi sino a 1 dB negli ultimi piani di di un edificio a 10 piani con struttura in CLS armato e acciaio.

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

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

Una stima dell'effetto locale di riduzione/amplificazione di ciascun edificio è possibile

parametrizzando gli effetti combinati secondo il seguente schema.

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

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

Effetto della variazione della frequenza di risonanza: se la stessa è maggiore di 20 Hz e minore di 40 Hz, si incrementa linearmente il valore di base, che viene fatto variare da 5 dB a 20 Hz sino a 20 dB a 40 Hz

Effetto dell'incastro del solaio:

App. Semplice	-2.0 dB
Inc. Imperfetto	+0.0 dB
Inc. Perfetto	+5.0 dB

Rapporto rigidezza/peso specifico del materiale:

Solaio in laterocem.	+ 0.0 dB
Volte o archi	- 4.0 dB

Spessore del solaio:

h = 40 cm	+8.0 dB
h = 30 cm	+3.0 dB
h = 24 cm	+0.0 dB
h = 12 cm	-2.5 dB

Luce del solaio

L = 10 m	-4.0 dB
L = 7 m	-3.0 dB
L = 5 m	-2.0 dB

L = 4 m	+0.0	dB
L = 3.5 m	+3.0	dB
L = 3.0 m	+8.0	dB

Attenuazione interpiano: si assume prudenzialmente una riduzione di 1 dB per ogni piano al di sopra del piano terra.

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

### Conclusioni

Pur in mancanza di una disposizione di legge che stabilisca limiti cogenti per i livelli di vibrazione negli edifici residenziali, esiste in Italia un sostanziale accordo fra tecnici e funzionari delle pubbliche amministrazioni sulla metodica di misurazione, sulle scale di valutazione e sui valori da rispettare.

Questo consente l'effettuazione di valutazioni sperimentali delle vibrazioni negli edifici residenziali, impiegando strumentazione normalizzata e garantendo in tal modo riproducibilità dei risultati e una ragionevole uniformità di applicazione.

Poiché nella maggior parte dei casi i limiti più restrittivi sono quelli legati al disturbo alle persone, conviene in prima istanza impostare la valutazione sulla verifica di tali limiti, cosa che richiede di operare con valori RMS dell'accelerazione ponderata espressi nella scala dei dB.

La norma UNI 9614 indica valori ragionevoli dei limiti da applicare a varie tipologie di edifici, limiti che vengono normalmente rispettati anche in vicinanza delle moderne infrastrutture di trasporto, purchè le stesse siano progettate e realizzate con adeguati accorgimenti antivibranti che limitino la fonte l'insorgere di fenomeni vibratorii.

Qualora invece si verificasse un significativo superamento dei limiti di disturbo alle persone, potrebbero paventarsi anche incipienti danni strutturali: in questi casi si applica la norma UNI 9916, che porta a valutare il valore di picco della velocità di vibrazione.

Nei casi di valutazione revisionale dell'impatto vibrazionale di sorgenti ancora da realizzare, semplici formule analitiche consentono un calcolo approssimato dell'attenuazione delle vibrazioni a seguito della propagazione nel terreno. Esistono inoltre tabelle e grafici che consentono di stimare parametricamente le attenuazioni o le amplificazioni causate dalle varie componenti strutturali degli edifici. Combinando queste informazioni, è possibile addivenire, con una certa approssimazione (tipicamente +/- 5 dB) ad una stima dei livelli di vibrazioni che si svilupperanno nelle zone più esposte degli edifici potenzialmente impattati.

Tenuto conto dell'incertezza suddetta, si può comunque valutare se la prevista sorgente di vibrazione

risulta potenzialmente impattante, oppure se la stessa è sicuramente accettabile (in quanto dà luogo, a calcolo, a valori dei livelli di accelerazione ponderata inferiori ai limiti previsti dalla UNI 9614 di almeno 5 dB).

### Bibliografia

- [1] G.A. Athanasopoulos, P.C. Pelekis, G.A. Anagnostopoulos – “Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurements” - *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 19 (2000) 277–288
- [2] Dong-Soo Kim, Jin-Sun Lee – “Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations” - *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 19 (2000) 115–126