



CONFRONTO TRA METRICHE PER LA VALUTAZIONE DEL DISTURBO DERIVANTE DALLE VIBRAZIONI NEGLI EDIFICI

METRICS COMPARISON FOR THE EVALUATION OF THE ANNOYANCE DUE TO VIBRATIONS IN BUILDINGS

Giovanni Moschioni(1)*, Bortolino Saggin(1), Marco Tarabini(1), Michele Gasparetto(1) Marco Aquati(2), Paolo Pezzoli (3)

- 1) Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica
- 2) Metropolitana Milanese
- 3) Indapro srl

* Indirizzo dell'autore di riferimento - Corresponding author's address:
Dipartimento di Meccanica – Via G. Previati 1/C, 23900 Lecco, ITALY
e-mail: giovanni.moschioni@polimi.it

(Ricevuto il 25/02/2015, accettato il 12/05/2015)

RIASSUNTO

L'articolo descrive l'analisi comparativa tra le metriche per la valutazione del disturbo descritte dalla norma UNI 9614:1990 e dalla ISO 2631-2:2003. La norma ISO 2631-2:2003 introduce una modalità di valutazione diversa basata su curva di ponderazione W_m e con calcolo del valore efficace secondo la norma ISO 8041:2005. Gli indici di valutazione del disturbo sono stati confrontati in diverse condizioni sperimentali: vibrazioni in edifici civili derivante da sorgenti stazionarie o non stazionarie originate da traffico ferroteamviario e macchinari. I risultati mostrano come le differenze tra i diversi metodi siano in genere trascurabili se confrontate alla variabilità dei fenomeni in esame.

ABSTRACT

This work describes a comparative analysis between different metrics for the evaluation of whole-body vibration disturbances. The metrics are the ones described in the Italian UNI 9614:1990 and in ISO 2631:2003. The latter uses different weighting curves and computes the running RMS using the procedures described in the ISO 8041:2005. The comparison has been performed in different experimental conditions (effect of trains and trams on buildings, effect of continuous and transient vibration generated by machineries in industrial buildings). Results show that the differences between the Italian and international standards are small in comparison with the typical phenomena variability.

Parole chiave: Vibrazioni corpo intero, ISO 2631, UNI 9614, accelerazioni.
Keywords: Whole-body vibration, ISO 2631, UNI 9614, acceleration.

1. Introduzione

Le vibrazioni all'interno degli edifici sono riconosciuta causa di disturbo e sono state oggetto di specifica normazione a partire dal 1978, anno della prima edizione della ISO 2631. Nell'approccio classico, legato a strumentazione di tipo analogico derivante dalle misure acustiche (IEC 651:1979, IEC 225, ISO 2631:1978) la vibrazione, misurata in accelerazione tra 1 e 80 Hz, deve essere analizzata in banda di ottava o di terzi d'ottava e successivamente confrontata con una curva di riferimento, tipicamente diversa per l'asse verticale e per gli assi orizzontali. Il principale limite di questo approccio consiste nel fatto che è valido solamente per vibrazioni stazionarie; per vibrazioni di livello non costante, evidentemente, la valutazione diventa particolarmente incerta, anche a causa degli artefatti di filtraggio legati all'analisi con banda a percentuale costante in corrispondenza dei transitori.

La norma italiana UNI 9614:1990, basata sulla ISO 2631-1:1989 prevede un approccio diverso, introducendo la ponderazione in frequenza del segnale, resa nel frattempo possibile dallo sviluppo tecnico degli strumenti e necessaria per colmare le lacune ed i problemi delle precedenti norme. La ponderazione può essere effettuata a partire dall'analisi in banda di un terzo d'ottava, se il segnale è stazionario. In questo caso il parametro descrittore dell'accelerazione è il valore efficace ottenuto dalla somma delle componenti dello spettro ponderato.

Nel caso di segnale non stazionario l'accelerazione deve essere filtrata nel tempo e se ne deve calcolare il valore efficace totale.

Con l'introduzione, nei primi anni 2000, della nuova famiglia di norme ISO 2631 e della ISO 8041 viene prevista la ponderazione esclusivamente con filtraggio nel dominio nel tempo (per il disturbo all'interno degli edifici con curva di ponderazione W_m), con sostanziale divieto della ponderazione a partire dagli spettri. Con questo passaggio concettuale le norme per le vibrazioni con effetti sul corpo umano si sono metodologicamente ricongiunte con quelle per l'acustica.

La ISO 2631-2:2003, a differenza delle precedenti, non indica né i limiti (obbligatori o consigliati) né quale, fra i parametri della vibrazione ponderata, debba essere utilizzato per la caratterizzazione dell'esposizione e, quindi, del disturbo. Il confronto tra le diverse curve di ponderazione (UNI 9164 ed ISO 2631-2) è illustrato in Figura 1.

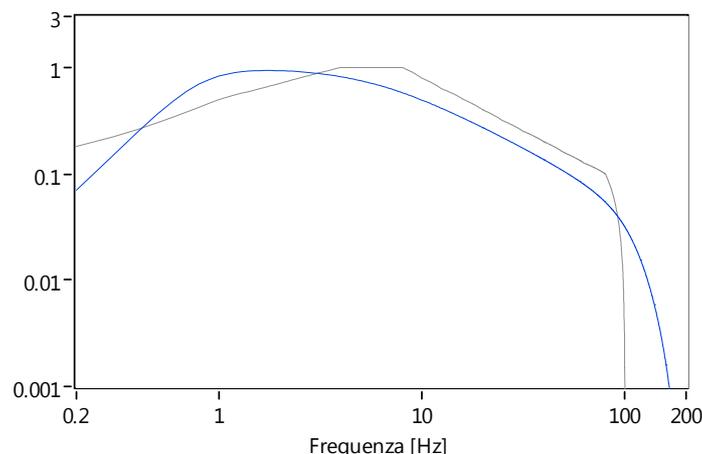


Fig- 1 - Funzione di risposta in frequenza delle ponderazioni UNI 9614 (grigio), W_m - ISO 2631 Z (blu) - Comparison between the weighting curves of the UNI 9614 (grey), the W_m - ISO2631 Z (Blue).

Per quanto riguarda la tipologia di parametro da impiegare per valutare il disturbo gli autori si sono basati sull'esito di uno studio approfondito svolto nel 2011 nel Regno Unito e finanziato dal Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA) [1]. In una delle sue parti [1,2] i ricercatori hanno indagato sul parametro migliore per correlare la relazione esposizione-risposta. La ricerca ha interessato misure di vibrazione di origine ferroviaria o industriale o interne agli edifici. Sui dati, i ricercatori hanno svolto elaborazioni confrontando 20 parametri diversi identificativi dello stesso evento, fra cui picco, MTVV, RMS, VDV, deviazione standard e percentili di vari livelli. Successivamente fra i descrittori dell'evento e il livello di disturbo dichiarato dai disturbati si è determinato il coefficiente di Spearman di correlazione per ranghi. Il risultato ha dimostrato che i diversi descrittori dell'esposizione alle vibrazioni presentano un valore di correlazione simile con il disturbo dichiarato. In altri termini, per valutare il disturbo percepito, il tipo di descrittore impiegato non è importante. Il tipo di parametrica di misure è, quindi, dipendente da fattori pratici, quali la comodità di elaborazione oppure l'esistenza di altri standard che suggeriscono l'impiego di un determinato parametro, basandosi su un vasta casistica di misure eseguite.

Per questo motivo in questa ricerca viene utilizzata, come riferimento, la norma norvegese NS 8176.E:2006 la quale, oltre a prevedere un algoritmo di calcolo affidabile, indica i valori da usare come riferimento per la soglia di disturbo.

2. Valutazione della vibrazione

Sia la norma UNI 9614:1990 sia la ISO 2631-2:2003 stabiliscono che il disturbo debba essere quantificato tramite indici derivati dalle accelerazioni misurate lungo tre assi perpendicolari come illustrato in Figura 2. La ISO 2631 attuale, tuttavia, supera il concetto introducendo la stessa ponderazione per i tre assi (come per la verità anticipato dalla stessa UNI 9614).

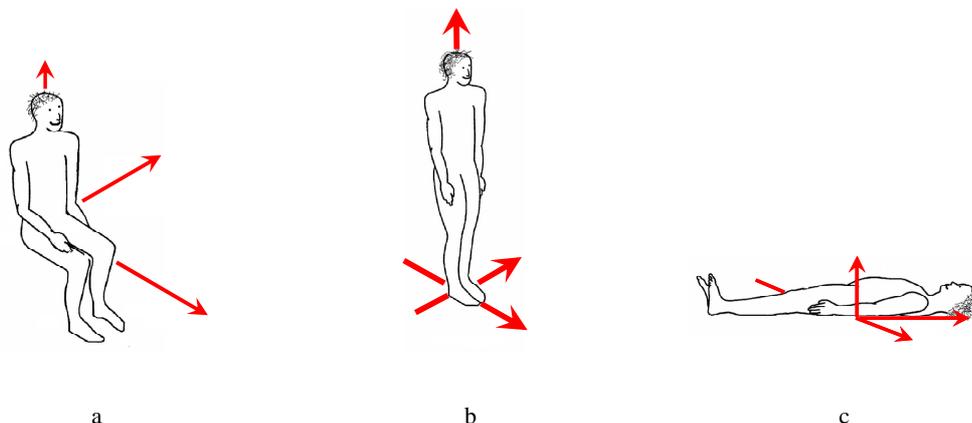


Fig. 2 - Sistema di assi coordinati per la misura di vibrazioni di tipo corpo intero -
Basicentric axes of the human body.

Secondo la UNI 9614, il valore di riferimento è il valore efficace della vibrazione nella banda tra 1 e 80 Hz, ponderata in frequenza secondo filtri diversi per i tre assi (X, Y e Z) quando la postura è nota e secondo una curva diversa quando la posizione non è nota a priori (Fig. 1). Nel caso di fenomeni stazionari le accelerazioni possono essere

ponderate attraverso la sottrazione della curva di attenuazione allo spettro in terzi di ottava. Nel caso di vibrazioni impulsive il disturbo è quantificato dal valore di picco dell'accelerazione ponderata, ridotto al valore RMS attraverso l'applicazione del fattore 0.71.

La norma ISO 2631-2, come detto, non indica quale parametro applicato all'accelerazione ponderata sia da utilizzare fra i molti possibili; tuttavia un'indicazione sul parametro da utilizzare è fornito dalla norma norvegese NS 8176.E:2006, che utilizza come parametro di base la massima accelerazione ponderata in frequenza W_m , ponderata nel tempo con costante di tempo (lineare) di un secondo. Il parametro descrittore utilizzato è il massimo valore della storia temporale del valore efficace. Successivamente la norma NS 8176.E:2006 prevede una serie di elaborazioni di natura statistica che esulano dall'ambito di interesse del presente articolo.

Si osserva che, in ossequio alla ISO 8041, per il calcolo della storia temporale dell'accelerazione ponderata, è consigliato utilizzare l'integrazione lineare al posto di quella esponenziale.

Da quanto illustrato è possibile osservare che non v'è possibilità di inferire a priori relazioni fra le varie grandezze indicate dalle norme per via analitica. È dunque di interesse generale verificare l'esistenza di una correlazione tra i diversi indici nel maggior numero di casi possibile. Il presente articolo presenta i risultati di un'analisi comparativa effettuata su 53 misurazioni effettuate in 4 condizioni tipiche di valutazione del disturbo. La procedura di analisi dati e il setup sperimentale sono descritti nel paragrafo 3. Il paragrafo 4 descrive i risultati sperimentali, che sono discussi e commentati nelle conclusioni, insieme agli sviluppi futuri.

Si evidenzia che lo scopo delle elaborazioni non è la ricerca di limiti da applicare, ma l'identificazione dei valori numerici assunti dai parametri indicati dalle diverse norme a fronte del medesimo fenomeno.

3. Metodo

È stata effettuata un'analisi comparativa tra i risultati dell'applicazione della UNI 9614:1990 e della ISO 26231/ NS 8176 in diversi casi:

- immissioni transitorie generate dal passaggio di veicoli ferroviari in prossimità di edifici residenziali; un primo set di prove (indicato da qui in avanti con la lettera A) legato all'immissione di treni in ambienti extra urbani; una seconda serie di prove quantifica il disturbo dei tram in condizioni simili (indicato con la lettera B). Entrambi i casi A e B sono caratterizzati da immissioni transitorie della durata dell'ordine di alcuni secondi;
- Immissioni transitorie generate da presse per stampaggio a caldo in prossimità di un edificio residenziale (indicati dalla lettera C). Nelle prove, come illustrato di seguito, vi sono sia condizioni di vibrazione stazionarie sia impulsive. Il set C è caratterizzato da numerosi eventi di durata di alcune centinaia di millisecondi;
- Immissioni stazionarie (indicate con lettera D) relative ad edifici residenziali in prossimità di una tessitura.

Gli accelerometri (piezoelettrici monoassiali Bruel & Kjaer 4508 B, triassiali PCB 356A21 e servoaccelerometri Jewell LSMP-20) sono stati posizionati sul pavimento dell'edificio al fine di valutare l'esposizione di persone in piedi con riferimento degli assi di Fig. 2b. Gli accelerometri nel caso C e D sono stati incollati al terreno mediante collanti ciano acrilici

Nei casi A e B gli stessi sono stati posizionati mediante masse aventi tre soli punti di appoggio al terreno. I segnali degli accelerometri piezoelettrici sono stati condizionati da centraline Bruel & Kjaer Nexus. Tutti i segnali sono stati acquisiti tramite hardware National Instruments (moduli NI 9234 alloggiati in chassis Compact DAQ, frequenza di acquisizione 2048 Hz); le storie temporali sono state salvate su un personal computer e analizzate offline mediante strumentazione virtuale. Alcune immagini delle campagne sperimentali sono illustrate in Figura 3.

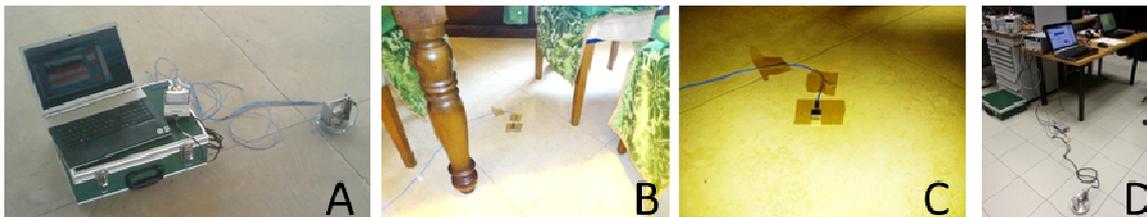


Fig. 3 - Immagini della catena di misura nei diversi casi sperimentali A, B, C e D.
- Views of the measurement chain in the different cases A, B, C and D.

Vengono calcolati i seguenti indici:

- a) Il valore RMS della vibrazione ponderata con la curva prevista dalla UNI 9614; il valore riportato è la combinazione vettoriale dei valori misurati lungo i tre assi di riferimento (indicato sinteticamente con “UNI”). Il valore efficace è calcolato dall’inizio alla fine dei fenomeni, come di diffusa prassi, con stima di inizio e fine al superamento della soglia rispetto al livello residuo;
- b) Il valore ottenuto calcolando il massimo dei valori della storia temporale del RMS con costante di tempo lineare di 1 s con la curva di ponderazione W_m (metodo indicato come “ISO-NS”);
- c) Il valore RMS in maniera simile ad a) ma avendo come ponderazione la curva W_m .

Sono stati analizzati 30 eventi di immissione relativi al passaggio di convogli ferroviari e 23 eventi di immissione a cicli di lavoro di lavorazione meccanica. Per ciascun evento è stata identificata la differenza percentuale tra valori le metriche 9614 e ISO-NS (utilizzando come riferimento il valore RMS della 9614), oltre che la media per ogni categoria di prove (A, B, C e D).

È stato inoltre confrontato il valore RMS totale con ponderazione 9614 e W_m (Fig. 1). Attraverso questo confronto è possibile confrontare, *ceteris paribus*, il diverso peso delle curve di ponderazione.

4. Risultati

A titolo di esempio si riportano i confronti fra valori RMS ponderati con la curva W_m (costante di tempo lineare pari a 1 s) e con la curva 9614 (costante di tempo Fast), in due casi appartenenti alle categorie A e C (Fig. 4).

Confronto tra metriche per la valutazione del disturbo derivante dalle vibrazioni negli edifici
Metrics comparison for the evaluation of the annoyance due to vibrations in buildings

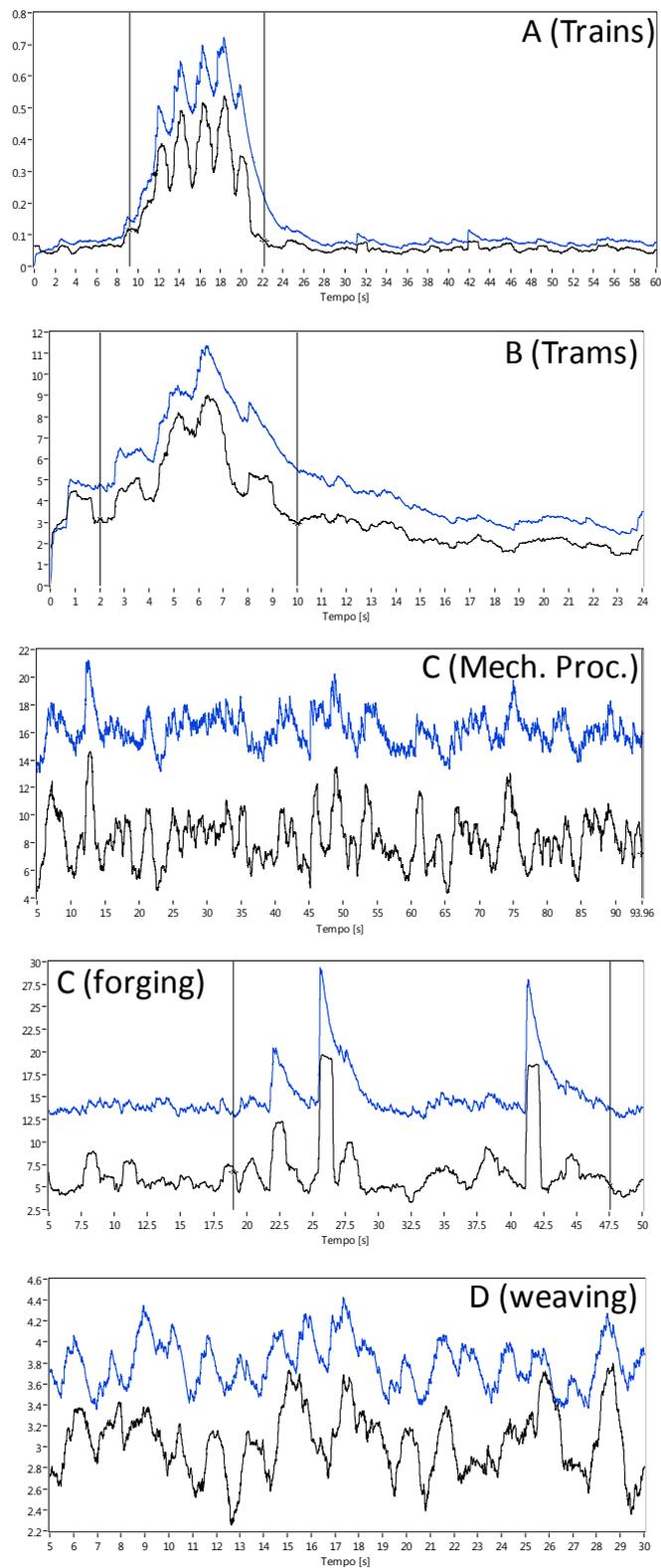


Fig. 4 - Confronto fra valori RMS ponderati con la curva W_m (in grigio) e con la curva 9614 (in azzurro) - Comparison between the RMS acceleration weighted with the curve W_m (grey curve) and 9614 (blue curve).

Confronto tra metriche per la valutazione del disturbo derivante dalle vibrazioni negli edifici
Metrics comparison for the evaluation of the annoyance due to vibrations in buildings

I grafici mostrano come le curve differiscano di quantità diverse in base al contenuto in frequenza dei segnali.

I risultati delle prove di tipo A, B, C e D sono illustrati in Figura 5.

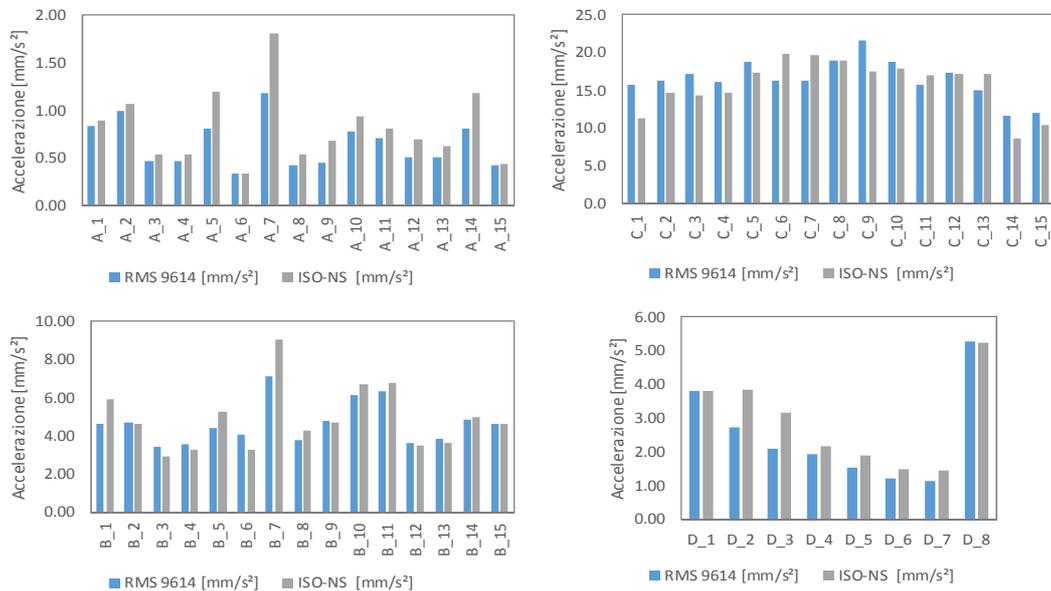


Fig. 5 - Confronto tra indici di disturbo RMS e ISO-NS nel caso di vibrazioni derivanti dal passaggio di convogli ferroviari (A e B), lavorazioni di stampaggio (C) e tessitura (D) – Comparison between the RMS and ISO-NS in case of trains (A), trams (B), forging (C) and weaving factory (D).

I grafici mostrano come genericamente gli indici di disturbo siano confrontabili (stesso ordine di grandezza); le differenze tra i valori UNI e ISO-NS sono state riportate in Tabella 1.

Tabella 1 - Differenze percentuali tra gli indici di disturbo RMS e ISO-NS nei casi analizzati – Differences between the RMS and ISO-NS based metrics.

Categoria prove	Differenza Ponderazioni [%]			
	A	B	C	D
1	-71%	-46%	-51%	-19%
2	-64%	-40%	-48%	-9%
3	-65%	-43%	-46%	1%
4	-61%	-38%	-49%	0%
5	-68%	-47%	-46%	-1%
6	-63%	-46%	-51%	17%
7	-61%	-45%	-50%	-10%
8	-66%	-34%	-45%	-24%
9	-43%	-43%	-52%	
10	-66%	-51%	-46%	
11	-61%	-42%	-46%	
12	-67%	-35%	-44%	
13	-64%	-40%	-47%	
14	-65%	-45%	-53%	
15	-64%	-45%	-51%	
Differenza media [%]	-63%	-43%	-48%	-6%

I dati mostrano che le differenze sono trascurabili nei casi B e C (differenza media del 4 e del 5 %), mentre sono più elevati nel caso A e del caso D (dove il metodo ISO-NS fornisce una valutazione numerica maggiore del 25%). Si noti come nelle analisi 1 e 8 del caso D, dove le vibrazioni sono pressoché stazionarie, le indicazioni dei metodi ISO-NS e UNI siano fondamentalmente analoghe.

Ulteriori analisi sono state effettuate comparando i valori RMS delle storie temporali ponderate con i filtri W_m e UNI 9614 (Fig. 1). Tale analisi fornisce un'indicazione della differenza tra le metriche imputabile unicamente alle differenze tra le diverse curve di ponderazione (Tabella 2).

Tabella 2 - Differenze percentuali tra i valori RMS ponderati secondo la norma UNI 9614 e ponderati W_m – Differences between the ISO 9614 and the W_m weighting curves.

Categoria prove	Differenza RMS [%]			
	A	B	C	D
1	7%	28%	-28%	0%
2	8%	-1%	-10%	41%
3	15%	-14%	-16%	54%
4	15%	-8%	-9%	12%
5	48%	19%	-8%	24%
6	2%	-19%	22%	27%
7	53%	26%	21%	25%
8	29%	14%	0%	-1%
9	52%	-1%	-19%	
10	21%	9%	-5%	
11	15%	7%	8%	
12	37%	-3%	-1%	
13	22%	-7%	14%	
14	46%	2%	-25%	
15	2%	1%	-13%	
Differenza media [%]	25%	4%	-5%	23%

Si noti che il valore RMS ponderato con la curva W_m sia sistematicamente inferiore (ad eccezione di due prove della categoria D) al valore ponderato con la curva ISO 9614. I motivi di tali differenze, come spiegato in seguito, sono da imputare al diverso contenuto armonico dei segnali.

Conclusioni

Le diverse metriche per la valutazione del disturbo derivante da vibrazioni portano a risultati sostanzialmente confrontabili. Le differenze sono generalmente limitate (mediamente inferiori al 20% e superiori al 50% solo in 3 casi sui 53 analizzati) e sono spiegabili alla luce delle differenze tra le procedure di calcolo indicate dalla ISO 2631 e dalla UNI 9614.

La prima differenza deriva dalle curve di ponderazione (illustrate in Fig. 1); la curva della UNI 9614 ha un massimo a frequenze più elevate e dà più rilevanza alle componenti a frequenze inferiori a 0.5 Hz. Per contro, la ponderazione della norma UNI 9614 non considera le componenti della vibrazione a frequenza superiore a 100 Hz che, seppur con peso molto ridotto, sono considerate dalla ISO 2631.

Una seconda differenza riguarda i due diversi metodi per il calcolo del valore efficace utilizzate nei due metodi:

- il metodo previsto dalla ISO 2631/NS 8176 adotta una costante di tempo lineare con durata pari a 1 s: il valore coincide con il più alto valore RMS calcolato su una durata di 1 s;
- Il metodo della UNI 9614 utilizza il valore efficace su tutta la storia del fenomeno.

Quindi nel caso in cui l'evento fisico abbia durata inferiore ad un secondo il valore ISO-NS sarà, per principio, inferiore al valore RMS. In particolare, il valore relativo tra RMS e NS dipenderà dalla durata dell'evento e dal rapporto tra valore di picco (nell'ovvio caso in cui la vibrazione residua sia trascurabile). Qualora la durata dell'evento sia superiore a 1 s, il valore sarà maggiore o eguale all'RMS.

L'effetto combinato di queste due differenze non è prevedibile analiticamente a priori, dipendendo dal contenuto spettrale del segnale e dall'andamento del tempo; ciò nonostante, sia i dati presentati nell'articolo sia l'esperienza pratica degli autori confermano che i metodi siano sostanzialmente equivalenti e possano essere utilizzati indifferentemente per la valutazione delle immissioni derivanti da vibrazioni di tipo corpo intero.

In conclusione, alla luce dei dati presentati nel presente articolo, le differenze tra i vari metodi sono mediamente contenute se si utilizza il massimo dell'accelerazione ponderata W_m in frequenza e nel tempo con costante di tempo di un secondo, lineare. Sono invece significative se si utilizza il parametro RMS applicato all'intero fenomeno.

Conclusions

The different metrics for the evaluation of the disturbance deriving from mechanical vibration in residential buildings lead to comparable results. The differences between the different methods are generally limited (average differences lower than 20%, larger than 5% only in 3 tests over 55) and are due to the different computation procedures indicated by the ISO 2631 and the UNI 9614.

The main difference derives from the weighting curves (shown in Fig. 1): the UNI 9614 weighting curve reaches the maximum value at larger frequencies and gives more relevance to frequencies lower than 0.5 Hz. On the contrary, the ISO 2631 weighting curve does not consider the components at frequencies larger than 100 Hz.

The second difference arises from the two methods for the computation of the disturbance:

- The method of the ISO 2631/NS 8176 uses a linear time constant of 1 s, and the disturbance is quantified by the larger RMS value on a sliding window lasting 1 s;
- The method of the UNI 9614 uses the RMS of the whole time history.

Consequently, whenever the event lasts less than 1 second, the disturbance quantified with the ISO-NS standard will be lower of the RMS value. The ratio between the RMS and the ISO-NS depends on the event duration. If the event lasts more than 1 s, the ISO value is larger than the RMS.

The combined effect of these two factors cannot be determined *a priori*, being dependent on the spectral content of the signal and on its time history. Nevertheless, both the data presented in this paper and the personal experience of the authors confirm that the two methods are generally comparable.

Bibliografia

- [1] Waddington, D., Moorhouse, A., Steele, A., Woodcock, J., Condie, J., Peris, E., Sica, G., Koziel, Z. (2011). *Human Response to Vibration in Residential Environments (NANR209)*. Final Project Report. London: Defra.
- [2] Woodcock, J., Peris, E., Condie, J., Sica, G., Koziel, K., Evans, T., Moorhouse, A., Steele, A., Waddington, D. (2011). *Human Response to Vibration in Residential Environments. Technical Report 6: Determination of exposure-response relationships (NANR209)*. London: Defra.
- [3] Banverket, Jernbaneverket, Ratahallintokeskus. (2001). WP 1, Existing regulations - Summary report of Swedish, Finnish and Norwegian Regulations, Joint Nordic Railway Vibration Research Project.
- [4] Klæboe, R., Brekke, A., Turunen-Rise, I.H., Hårvik, L., Madshus, C. (2003). *Vibration in dwellings from road and rail traffic - Part I: a new Norwegian measurement standard and classification systems*. *Applied Acoustics*, 64(1), pp. 71–87.
- [5] Klæboe, R., Turunen-Rise, I.H., Hårvik, L., Madshus C. (2003). *Vibration in dwellings from road and rail traffic - Part II: exposure–effect relationships based on ordinal logit and logistic regression models*. *Applied Acoustics*, 64(1), pp. 89–109.
- [6] Elias, P., Villot, M. (2011). D1.4: Review of existing standards, regulations and guidelines, as well as laboratory and field studies concerning human exposure to vibration. *Railway-Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative Project (RIVAS) WP1: Assessment and Monitoring Procedures. T1.1: Assessment of Human Exposure*. pp. 1-65.
- [7] NS (2006). NS 8176.E *Vibration and shock - Measurement of vibration in buildings from landbased transport and guidance to evaluation of its effects on human beings*. Standards Norway.
- [8] ISO (2003). *ISO 2631-2 Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)*. Geneva, Switzerland: ISO.
- [9] UNI (1990). *UNI 9614:1990 Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo*. Ente Italiano di Normazione.