

Massimo Bovenzi, Marcella Mauro

I valori guida nella valutazione del rischio da vibrazioni meccaniche

Unità Clinica Operativa di Medicina del Lavoro, Dipartimento di Scienze Mediche, Chirurgiche e della Salute, Università degli Studi di Trieste

RIASSUNTO. In questo studio vengono discussi i valori giornalieri di azione (VA) e i valori limite di esposizione giornaliera (VL) per le vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio e le vibrazioni trasmesse al corpo intero, stabiliti dalla Direttiva EU 2002/44/CE e recepiti dal D.Lgs. 81/2008, ed espressi in termini di valore efficace (r.m.s.) dell'accelerazione ponderata in frequenza normalizzata a 8 ore di lavoro ($A(8)$). I dati della letteratura epidemiologica tendono a supportare il VA $A(8)$ di 2.5 ms^{-2} r.m.s. e il VL $A(8)$ di 5 ms^{-2} r.m.s. per le vibrazioni mano-braccio almeno per la componente vascolare (fenomeno di Raynaud secondario) della sindrome da vibrazioni mano-braccio. Vi è qualche evidenza sperimentale per il VA $A(8)$ di 0.5 ms^{-2} r.m.s. per le vibrazioni al corpo intero, mentre non vi sono elementi di validazione biodinamica o epidemiologica per il VL $A(8)$ di 1.15 ms^{-2} r.m.s., opportunamente abbassato a 1 ms^{-2} r.m.s. nella legislazione italiana.

Parole chiave: valori guida, vibrazioni meccaniche, epidemiologia, biodinamica.

ABSTRACT. GUIDELINES FOR OCCUPATIONAL EXPOSURES TO MECHANICAL VIBRATION. In this study, the daily exposure action values (EAV) and the daily exposure limit values (ELV) for hand-transmitted vibration (HTV) and whole-body vibration (WBV), established by the EU Directive 2002/44/EC and the Italian Decree 81/2008, and expressed in terms of 8-hr frequency weighted r.m.s. acceleration magnitude, are discussed upon consideration of the findings of experimental and epidemiological studies. There is some epidemiological support for the EAV $A(8)$ of 2.5 ms^{-2} r.m.s. and the ELV $A(8)$ of 5 ms^{-2} r.m.s. for HTV, at least for the vascular component (secondary Raynaud's phenomenon) of the hand-arm vibration syndrome. There is some experimental evidence for the EAV $A(8)$ of 0.5 ms^{-2} r.m.s. for WBV, while there is neither biodynamic nor epidemiological validation for the ELV $A(8)$ of 1.15 ms^{-2} r.m.s. for WBV, this latter lowered to 1 ms^{-2} r.m.s. in the Italian legislation.

Key words: exposure values, mechanical vibration, epidemiology, biodynamics.

Introduzione

I valori guida e le disposizioni per la protezione dei lavoratori contro il rischio da vibrazioni meccaniche sono stabiliti dalla Direttiva 2002/44/CE (1), recepita nel nostro Paese dapprima nel D.Lgs. 187/2005 e infine nel D.Lgs. 81/2008 (Titolo VIII, Capo I e III, Allegato XXXV), (2).

La Direttiva EU 2002/44/CE offre due differenti metriche per la valutazione del rischio da vibrazioni meccaniche, entrambe basate sulla misura della magnitudo dell'accelerazione ponderata in frequenza delle vibrazioni (a_w) in funzione della risposta frequenza-dipendente del corpo umano, ovvero nell'intervallo tra 6.3 e 1250 Hz per le vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio (*hand-transmitted vibration*, HTV), e tra 0.5 e 80 Hz per le vibrazioni trasmesse al corpo intero (*whole-body vibration*, WBV). Gli standard ISO 5349-1 (3) e ISO 2631-1 (4) forniscono le caratteristiche dei filtri di ponderazione in frequenza per la misura della quantità a_w per HTV e WBV, rispettivamente.

La prima metrica di valutazione del rischio da vibrazioni meccaniche è rappresentata dal valore efficace (o root-mean-square, r.m.s.) dell'accelerazione ponderata in frequenza normalizzata a un periodo di riferimento di 8 ore di lavoro [$A(8)$], calcolato con il metodo della seconda potenza (*second power time dependency*). La metrica $A(8)$ può essere utilizzata per la valutazione del rischio sia da HTV sia da WBV.

Per HTV, la metrica $A(8)$ è calcolata mediante l'equazione:

$$A(8) = \left(\sum_i a_{hwvi}^2 \times \frac{t_{di}}{T_{(8)}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{ms}^{-2} \text{ r. m. s.}) \quad (\text{Eq. 1})$$

ove t_{di} è il tempo d'uso giornaliero dell'utensile i , $T_{(8)}$ è la durata di riferimento di 8 ore, e a_{hwvi} è il valore totale delle accelerazioni r.m.s. ponderate in frequenza dell'utensile i ovvero la radice quadrata della somma dei quadrati delle accelerazioni r.m.s. ponderate in frequenza lungo i tre assi ortogonali di misura x , y , z [$a_{hwv} = (a_{hw x}^2 + a_{hw y}^2 + a_{hw z}^2)^{1/2}$].

Per WBV, la metrica $A(8)$ è calcolata mediante l'equazione:

$$A(8)_{max} = \left(\sum_i a_{wi(max)}^2 \times \frac{t_{di}}{T(8)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (ms^{-2} \text{ r. m. s.}) \quad (Eq. 2)$$

ove t_{di} è il tempo di esposizione giornaliero alle vibrazioni della macchina/veicolo i , $T(8)$ è la durata di riferimento di 8 ore, e $a_{wi(max)}$ è il valore più elevato delle accelerazioni r.m.s. ponderate in frequenza della macchina/veicolo i rilevate sui tre assi ortogonali x, y, z ($1.4a_{wx}, 1.4a_{wy}, a_{wz}$, per un lavoratore seduto o in piedi).

Nel caso di esposizione a vibrazioni impulsive o a transienti vibratori al corpo intero (WBV), la Direttiva EU consente l'uso di un metodo di valutazione addizionale, definito metodo della quarta potenza (*fourth power time dependency*) in quanto la sperimentazione biodinamica di laboratorio sembra indicare che il metodo della seconda potenza tende a sottostimare gli effetti sulla salute causati dall'esposizione a vibrazioni con componenti impulsive. Qualora le WBV contengano transienti o shock, la Direttiva EU suggerisce l'uso di una seconda metrica definita Valore della Dose di Vibrazioni (VDV), calcolata con la seguente equazione:

$$VDV_{max} = \left[\int_{t=0}^{t=T} a_{w(max)}^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (ms^{-1.75}) \quad (Eq. 3)$$

ove $a_{w(max)}(t)$ è l'accelerazione istantanea ponderata in frequenza misurata lungo l'asse dominante e T è il tempo di misura.

La Direttiva EU ha stabilito *valori giornalieri di azione* e *valori limite giornalieri di esposizione* sia per HTV sia per WBV. Per valori d'azione si intende quei valori di $A(8)$ o VDV al superamento dei quali il datore di lavoro deve implementare azioni amministrative, tecniche e sanitarie volte a salvaguardare lo stato di salute dei lavoratori. Per valori limite giornalieri di esposizione si intendono quei valori di $A(8)$ o VDV che non devono mai essere superati in quanto le indagini biodinamiche e gli studi epidemiologici hanno rilevato un'elevata probabilità di danni alla salute nei lavoratori esposti.

La quasi totalità dei Paesi Europei, Italia inclusa, ha adottato $A(8)$ come metrica di preferenza per la valutazione del rischio da WBV.

I valori guida per le vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio

La Direttiva dell'Unione Europea sulle vibrazioni e il D.Lgs. 81/2008 definiscono le vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio come "le vibrazioni meccaniche che, se trasmesse al sistema mano-braccio nell'uomo, comportano un rischio per la salute e la sicurezza dei lavoratori, in particolare disturbi vascolari, osteoarticolari, neurologici o muscolari" (1, 2). Si assume, pertanto, che l'esposizione occupazionale a HTV possa causare danni a tutte le strutture anatomiche degli arti superiori. Nella legislazione del nostro paese, tale asserzione trova riscontro sia nel D.M. dd. 10.06. 2014 che riporta l'aggiornamento dell'elenco delle malattie per le quali è obbligatoria la denuncia e nel quale le patologie da HTV sono inserite nella lista I, ovvero la lista contenente le malattie la cui origine lavorativa è considerata di elevata probabilità, sia nel D.M. dd. 09.04.2008 che riporta l'elenco delle malattie professionali indennizzabili e tra quelle causate da HTV sono incluse la sindrome di Raynaud secondaria, le osteoartropatie degli arti superiori (polso, gomito, spalla) e le neuropatie periferiche dei nervi mediano e ulnare. Le lavorazioni imputate sono quelle svolte in modo non occasionale, che comportano l'impiego di utensili, attrezzature, macchine ed apparecchi che trasmettono vibrazioni al sistema mano-braccio.

Nella Direttiva EU e nel D.Lgs. 81/2008 il valore giornaliero di azione e il valore limite giornaliero di esposizione sono espressi con la metrica $A(8)$ calcolata con (Eq. 1), e sono fissati, rispettivamente, a 2.5 e 5 ms^{-2} r.m.s. (Tabella I). Il Testo Unico 81/2008, ma non la Direttiva EU, ha inoltre previsto un valore di esposizione per brevi periodi alle vibrazioni mano-braccio pari a 20 ms^{-2} r.m.s. allo scopo di evitare l'occorrenza di possibili effetti acuti o di rischi indiretti di infortunio derivanti dall'esposizione a vibrazioni di elevata ampiezza.

Esiste un certo grado di validazione epidemiologica, pur con limitazioni, per i valori guida stabiliti dalla Direttiva EU per le vibrazioni mano-braccio come suggerito dai risultati di studi epidemiologici trasversali e di coorte retrospettivi e prospettici (5, 6). Tali studi epidemiologici formano la base materiale della relazione esposizione-risposta proposta nell'Appendice C allo standard ISO 5349-1 (3).

Tabella I. Valore giornaliero di azione e valore limite giornaliero di esposizione per le vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio (hand-transmitted vibration, HTV) e per le vibrazioni trasmesse al corpo intero (whole-body vibration, WBV), espressi in termini di accelerazione r.m.s. ponderata in frequenza normalizzata a un periodo di riferimento di 8 ore, $A(8)$, e di Valore di Dose delle Vibrazioni (VDV) secondo la Direttiva EU 2002/44/CE e il D.Lgs. 81/2008

Valori guida	HTV	WBV
Valore giornaliero di azione	$A(8) = 2.5 \text{ ms}^{-2}$ r.m.s.	$A(8)_{max} = 0.5 \text{ ms}^{-2}$ r.m.s. $VDV_{max} = 9.1 \text{ ms}^{-1.75}$
Valore limite giornaliero di esposizione	$A(8) = 5.0 \text{ ms}^{-2}$ r.m.s.	$A(8)_{max} = 1.15 \text{ ms}^{-2}$ r.m.s. $= 1 \text{ ms}^{-2}$ r.m.s. (Italia) $VDV_{max} = 21 \text{ ms}^{-1.75}$
Esposizione per un breve periodo	20 ms^{-2} r.m.s. (Italia)	1.5 ms^{-2} r.m.s. (Italia)

Sebbene la relazione esposizione-risposta dell'ISO venga dichiarata applicabile a tutti gli effetti avversi provocati da HTV, in realtà tale relazione è limitata all'occorrenza del fenomeno di Raynaud ("dito bianco" o *vibration-induced white finger*, VWF, secondo la terminologia usata nei Paesi anglosassoni), in quanto la variabile "risposta" è definita come "la probabilità di insorgenza di VWF nel 10% dei soggetti di una popolazione esposta a vibrazioni mano-braccio". La relazione esposizione-risposta suggerita dall'ISO 5349-1 è definita dalla seguente equazione:

$$D_y = 31.8 A(8)^{-1.06}$$

ovvero la probabilità di insorgenza del fenomeno di Raynaud (VWF) nel 10% di una popolazione di lavoratori esposti a HTV è funzione del valore di $A(8)$ in ms^{-2} r.m.s. e della durata media dell'esposizione nel gruppo di lavoratori indagati (D_y in anni).

Qualora si utilizzasse la relazione esposizione-risposta dell'ISO 5349-1 per predire la durata di esposizione necessaria per l'occorrenza di VWF nel 10% dei lavoratori esposti ai valori guida EU, ne risulterebbero 12 anni per l'esposizione al valore di azione e 5.8 anni per l'esposizione al valore limite giornaliero.

La relazione esposizione-risposta dell'ISO 5349-1 e i risultati degli studi epidemiologici suggeriscono, pertanto, che i valori guida stabiliti dalla Direttiva EU per HTV non rappresentano valori di sicurezza o comunque protettivi per la salute dei lavoratori in quanto l'esposizione al valore giornaliero di azione è comunque associata all'occorrenza di angiopatia da vibranti dopo alcuni anni di esposizione.

I valori guida per le vibrazioni trasmesse al corpo intero

La Direttiva EU sulle vibrazioni meccaniche (1) e il D.Lgs. 81/2008 (2) definiscono le vibrazioni trasmesse al corpo intero come "le vibrazioni meccaniche che, se trasmesse al corpo intero, comportano rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori, in particolare lombalgie e traumi del rachide". Questa definizione è più restrittiva di quella adottata per le vibrazioni mano-braccio, in quanto il solo rachide lombare viene individuato quale possibile struttura bersaglio dell'azione lesiva delle vibrazioni trasmesse al corpo intero. Revisioni della letteratura e studi meta-analitici concordano nell'attribuire una forte evidenza epidemiologica all'associazione tra patologie del rachide lombare (lombalgia, sciatica, discopatie e ernie di-

scali lombari) ed esposizione professionale a vibrazioni trasmesse al corpo intero (5, 7).

Nella legislazione del nostro Paese, l'ernia discale lombare è riconosciuta come malattia professionale per lavorazioni svolte in modo non occasionale con macchine che espongono a vibrazioni trasmesse al corpo intero, quali macchine movimentazione materiali vari, trattori, gru portuali, carrelli sollevatori (muletto), trattori, mietitrebbia, vendemmiatrici semoventi, imbarcazioni per pesca professionale costiera e d'altura.

Nell'appendice B allo standard ISO 2631-1 (4) viene offerto un primo tentativo di definire zone di cautela per la salute (*health guidance caution zones*) nei lavoratori esposti a WBV. La Tabella II riporta i valori di $A(8)$ e VDV associati a livelli di rischio basso (effetti non documentati), moderato (effetti possibili) e elevato (effetti probabili) per disturbi/lesioni al rachide lombare secondo lo standard ISO 2631-1. I valori guida ISO derivano principalmente da studi sperimentali di biomeccanica eseguiti in laboratorio e nello stesso standard è posta l'avvertenza che non sono disponibili sufficienti studi epidemiologici per definire quantitativamente una relazione esposizione-risposta e per stimare la probabilità di effetti avversi da vibrazioni trasmesse al corpo intero.

Nonostante queste limitazioni, la Direttiva EU ha stabilito i valori di azione e i valori limite di esposizione per WBV riportati nella Tabella I ed espressi in termini di $A(8)_{\text{max}}$ e VDV_{max} calcolati con (Eq. 2) e (Eq. 3), rispettivamente. Dal confronto con i valori guida suggeriti dall'ISO 2631-1, si nota che i valori di esposizione della Direttiva EU sono decisamente più elevati, in particolare per quanto riguarda i valori limite giornalieri di esposizione. Laddove i valori di azione EU (0.5 ms^{-2} r.m.s. per $A(8)_{\text{max}}$; $9.1 \text{ ms}^{-1.75}$ per VDV_{max}) sono parzialmente giustificati da evidenze biodinamiche e non si discostano molto dai valori guida ISO per un rischio basso (0.45 ms^{-2} r.m.s. per $A(8)$; $8.5 \text{ ms}^{-1.75}$ per VDV), i valori limite EU (1.15 ms^{-2} r.m.s. per $A(8)_{\text{max}}$; $21 \text{ ms}^{-1.75}$ per VDV_{max}) rappresentano livelli di esposizione eccessivamente elevati e non supportati da evidenza sperimentali o epidemiologiche ma imposti da alcune delegazioni degli Stati Membri EU ben consapevoli che le associazioni imprenditoriali nazionali non sarebbero state in grado di garantire il rispetto di limiti di esposizione più contenuti. Nella medesima direzione va interpretata la disposizione EU di calcolare $A(8)_{\text{max}}$ e VDV_{max} per WBV sulla base dell'accelerazione misurata lungo l'asse dominante e non come somma vettoriale triassiale analogamente alle vibrazioni mano-braccio (cfr. Eq. 1 vs Eq. 2 e 3) in quanto ne risulterebbe un aumento dei valori di $A(8)$ e

Tabella II. Zone di cautela per la salute (*health guidance caution zones*) nei lavoratori esposti a vibrazioni trasmesse al corpo intero secondo lo standard ISO 2631-1, Appendice B (1997)

Effetti avversi	Rischio	ISO 2631-1	
		$A(8)$ (ms^{-2} r.m.s.)	VDV ($\text{ms}^{-1.75}$)
Effetti non documentati	Basso	< 0.45	< 8.5
Effetti possibili	Moderato	0.45 - 0.90	8.5 - 17
Effetti probabili	Elevato	> 0.90	> 17

VDV per l'esposizione alle vibrazioni generate dalla maggior parte delle macchine industriali o agricole con l'eccezione, forse, dei veicoli di pubblica utilità. Anche la decisione della quasi totalità dei Paesi EU di adottare $A(8)_{\max}$ come metrica preferenziale per la valutazione del rischio da WBV ha una motivazione di convenienza: a parità di macchina/veicolo, condizioni operative di guida e magnitudo dell'accelerazione istantanea delle vibrazioni con componenti impulsive, la misura di VDV_{\max} più facilmente di $A(8)_{\max}$ tende ad avvicinarsi o superare il valore giornaliero di azione oltre il quale scatta l'obbligo della sorveglianza sanitaria dei lavoratori esposti.

Pur avendo il nostro Paese scelto $A(8)_{\max}$ come metrica per la valutazione del rischio da WBV, tuttavia il valore limite giornaliero di esposizione è stato abbassato a un più ragionevole 1 ms^{-2} r.m.s. e in analogia con quanto stabilito per le vibrazioni mano-braccio è stato previsto un valore di esposizione per brevi periodi alle vibrazioni al corpo intero pari a 1.5 ms^{-2} r.m.s. (Tabella I).

Conclusioni

Dalla disamina dei valori guida per la valutazione del rischio occupazionale da vibrazioni meccaniche stabiliti dalla Direttiva EU 2002/44/CE e dal Testo Unico D.Lgs. 81/2008, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Vi sono elementi di validazione epidemiologica per i valori guida nella valutazione del rischio da vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio (valore giornaliero di azione $A(8)$: 2.5 ms^{-2} r.m.s.; valore limite giornaliero di esposizione $A(8)$: 5 ms^{-2} r.m.s.) almeno per quanto riguarda la componente vascolare (fenomeno di Raynaud secondario) della sindrome da vibrazioni mano-braccio;
- I valori guida per la valutazione del rischio da vibrazioni trasmesse al corpo intero non sono epidemiologicamente validati;

- Gli studi sperimentali di biodinamica forniscono qualche supporto ai valori di azione ma non ai valori limite di esposizione a vibrazioni trasmesse al corpo intero;
- I valori guida della Direttiva EU e del D.Lgs. 81/2008 non rappresentano valori di sicurezza per la salute dei lavoratori in quanto gli studi epidemiologici hanno evidenziato l'occorrenza di patologie vibrazioni-correlate per esposizioni inferiori ai valori giornalieri di azione.

Bibliografia

- 1) Direttiva 2002/44/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 25 giugno 2002 sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (vibrazioni) (sedicesima direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1, della direttiva 89/391/CEE). Gazzetta Ufficiale delle Comunità Europee L 177/13, 6.7.2002.
- 2) Decreto Legislativo 9 Aprile 2008, n. 81 e Decreto legislativo 3 agosto 2009, n. 196. Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro. Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. Gazzetta Ufficiale n. 101 del 30 aprile 2008 - Suppl. Ordinario n. 108 e Gazzetta Ufficiale n. 180 del 5 agosto 2009 - Suppl. Ordinario n. 142/L.
- 3) International Organization for Standardization. Mechanical vibration - Measurement and the evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration. Part 1: General requirements. Geneva: ISO 5349-1, 2001.
- 4) International Organization for Standardization. Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General requirements. Geneva: ISO 2631-1, 1997.
- 5) European Committee for Standardization. Mechanical vibration - Guide to the health effects of vibration on the human body. CEN Report 12349. CEN, Brussels, 1996.
- 6) Bovenzi M. Exposure-response relationship in the hand-arm vibration syndrome: an overview of current epidemiology research. Int Arch Occup Environ Health 1998; 71: 509-19.
- 7) Bovenzi M, Hulshof CTJ. An updated review of epidemiologic studies on the relationship between exposure to whole-body vibration and low back pain. Int Arch Occup Environ Health 1999; 72: 351-65.

Corrispondenza: Massimo Bovenzi, Professore Ordinario, Unità Clinica Operativa di Medicina del Lavoro, Dipartimento di Scienze Mediche, Chirurgiche e della Salute, Università degli Studi di Trieste, Via della Pietà 2/2, 34129 Trieste, Italy, E-mail: bovenzi@units.it