

## IL RISCHIO DA VIBRAZIONI AL CORPO INTERO: DUBBI INTERPRETATIVI ED ASPETTI IRRISOLTI ALLA LUCE DELLA DIRETTIVA 2002/44/CE

*P. De Santis\**, *R. Nitti\**, *G. Rosci\**

\* INAIL - Direzione Regionale Lazio - Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione

### RIASSUNTO

La Direttiva 2002/44/CE detta prescrizioni minime in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi per la salute e la sicurezza, che derivano dall'esposizione a vibrazioni meccaniche, con indicazione dei valori limiti e di azione. La valutazione del livello di esposizione alle vibrazioni si basa principalmente sul calcolo dell'esposizione giornaliera, espressa come accelerazione continua equivalente su 8 ore A(8) o della dose di vibrazioni (VDV), lasciando la discrezionalità della scelta tra le due diverse grandezze agli Stati membri.

Il presente lavoro, ripercorrendo casi specifici, vuole porre l'attenzione su come i due metodi spesso non siano "sovrapponibili" ed in definitiva possano portare a risultati differenti nella valutazione dell'esposizione.

### SUMMARY

Directive 2002/44/EC lays down minimum requirements in matter of protection of workers from risks to their health and safety, arising from the exposure to mechanical vibrations, with indication of limit and action values. The assessment of the level of exposure to vibrations is mainly based on the calculation of daily exposure A(8) expressed as equivalent continuous acceleration over an eight hour period or on vibration dose values (VDV), Member States are given the option of choice between the two different parameters.

The present work, starting over specific cases, focuses the attention on how the two methods often are not equivalent and after all they can carry you to different evaluations of the exposure.

### 1. IL RISCHIO DA VIBRAZIONI AL CORPO INTERO

Le problematiche che insorgono per effetto della vibrazione sul corpo umano sono di diversa entità e qualità: si può avere un affaticamento con progressiva riduzione nelle capacità di svolgere un'attività; si possono avere, come causa prima, o concausa scatenante, alcune patologie. Le problematiche connesse sono ricondotte a due filoni paralleli:

1. Vibrazione del corpo intero - WBV (Whole Body Vibration)
2. Vibrazione del sistema mano-braccio - HAV (Hand Arm Vibration).

Per vibrazione del corpo intero, di interesse per il caso in esame, si intende una sollecitazione meccanica di natura oscillatoria che coinvolge l'organismo umano nella sua totalità: tipicamente è quanto avviene su un mezzo di trasporto, su un mezzo di movimento terra, su un trattore nelle lavorazioni agricole, ecc.

Il corpo umano è, dal punto di vista meccanico, un sistema di particolare complessità: se sottoposto ad una sollecitazione, caratterizzata da uno spettro ampio distribuito nell'intervallo tra

0,5 e 80 Hz, i diversi organi possono essere sottoposti a sollecitazioni differenziate e compiere spostamenti relativi l'uno rispetto all'altro. Per sollecitazioni a frequenza inferiore a 0,5 Hz l'organismo si comporta come una massa unica, seguendo in modo omogeneo gli spostamenti della struttura vibrante con la quale è a contatto. Le vibrazioni a frequenza superiore a 80 Hz coinvolgono invece la sola zona superficiale, prossima all'area di ingresso, in quanto, le proprietà di attenuazione degli strati immediatamente sottostanti, provocano un rapido smorzamento della sollecitazione.

La risposta dipende anche dalla direzione d'azione della vibrazione. La sollecitazione verticale che si trasmette dalla zona d'appoggio verso il capo per i soggetti in posizione eretta o seduta, provoca risposte differenti rispetto a quelle generate da una sollecitazione che agisce sul piano orizzontale. Lo studio delle vibrazioni al corpo intero parte dal fissare un sistema di riferimento in quanto l'accelerazione è una grandezza vettoriale, che può essere espressa attraverso le componenti nelle tre direzioni spaziali di un riferimento ortogonale OXYZ.

Si parla di sistema di riferimento basicentrico (Figura 1), quando l'origine O coincide col punto di ingresso della vibrazione nel corpo umano; si parla di sistema di riferimento biocentrico, quando l'origine viene fatta coincidere con un punto dell'organismo umano.

Nella Figura 5 si può evincere come nel: sistema di riferimento basicentrico l'orientamento degli assi non muta per i soggetti in postazione eretta e per la vibrazione dello schienale. Per soggetti in posizione sdraiata gli assi mantengono il medesimo orientamento rispetto al corpo.



Figura 1: Sistema di riferimento basicentrico

Definito il sistema di riferimento, occorre adottare la ponderazione in frequenza per valutare l'effetto della vibrazione su un sistema la cui risposta alla sollecitazione varia con la frequenza.

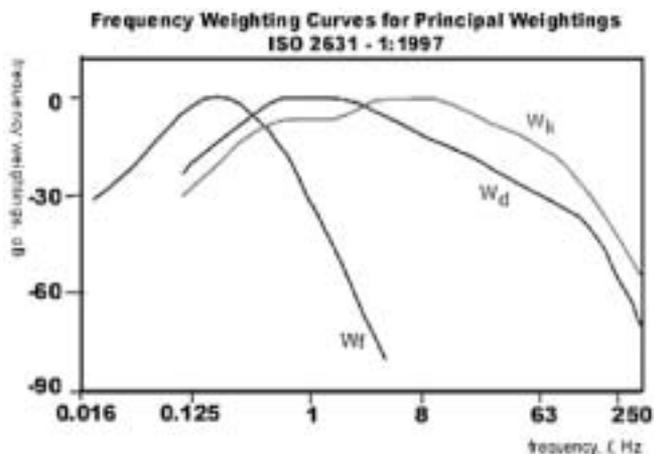


Figura 2: Filtri di ponderazione principali

Infatti la sensibilità del corpo umano standard alle componenti della vibrazione lungo le tre direzioni, varia alle diverse frequenze. Pertanto il contributo delle componenti in frequenza per le quali la sensibilità è minore, dovrà essere ridotto proporzionalmente. La procedura, nel suo insieme, si sintetizza rappresentando un filtro di ponderazione, che opera attenuando i contributi energetici delle diverse frequenze che compongono il segnale, in maniera inversamente proporzionale alla sensibilità. I filtri di ponderazione per le componenti X, Y ( $W_d$ ) e Z ( $W_k$ ) (Figura 2), si applicano per valutare l'effetto sulla salute di soggetti seduti.

## 2. LA NORMATIVA

Le normative di riferimento per le vibrazioni dell'intero corpo sono lo standard ISO 2631-1 del 1997, intitolato "Vibrazioni meccaniche ed urti. Valutazione dell'esposizione umana alla vibrazione del corpo intero" e la Direttiva 2002/44/CE.

### 2.1 Lo standard ISO 2631-1

Per quanto riguarda la conservazione dello stato di salute, viene chiaramente indicato che le indicazioni si riferiscono a vibrazioni trasmesse al corpo di un soggetto seduto. Infatti gli effetti delle vibrazioni sullo stato di salute di una persona in postazione eretta o sdraiata non sono sufficientemente noti. Gli effetti sulla salute che lo standard intende prevenire, sono soprattutto quelli a carico del tratto lombare del rachide e del sistema nervoso collegato (lombalgie e lombosciatalgie, discopatie, ernie discali lombari, ecc.).

La valutazione della vibrazione in accordo con lo Standard ISO 2631-1 richiede la misura del valore efficace della vibrazione ponderata, in relazione all'asse ed all'effetto considerati: vanno cioè rilevati i valori efficaci delle 3 componenti assiali del vettore accelerazione e ponderati secondo i filtri caratteristici per la salute, il comfort, la percezione e la cinetosi. Per quanto concerne la valutazione degli effetti sulla salute è necessario considerare unicamente la componente dominante dell'accelerazione, moltiplicata per l'appropriato fattore correttivo  $k_j$ . Il criterio definito si basa sulla seguente relazione di equivalenza tra due esposizioni quotidiane a vibrazioni (o "*principio di ugual energia*"):

$$a_{n1} T_1^{1/2} = a_{n2} T_2^{1/2} \quad (1)$$

Nel caso di componenti impulsive, lo standard definisce una metodica valutativa addizionale, in quanto si ritiene che la metodica primaria, basata sulla valutazione delle componenti rms delle accelerazioni ponderate, potrebbe portare a sottostimare l'esposizione.

Il criterio definito dallo standard ai fini della valutazione dell'esposizione a tali tipologie di vibrazioni, si basa su un'assunzione di equivalenza differente:

$$a_{n1} T_1^{1/4} = a_{n2} T_2^{1/4} \quad (2)$$

Il grafico di Figura 3 riporta le linee guida per la salvaguardia della salute basate sulla relazione di equivalenza tra i valori limite, in base alle Equazioni (1) e (2), valida in un certo inter-

vallo dei tempi di esposizione giornalieri. La regione sottostante la curva inferiore individua le condizioni per le quali non esistono evidenze di possibili effetti sulla salute; la regione compresa tra le due curve individua invece quelle a rischio potenziale. Le esposizioni che si collocano al disopra della linea superiore sono da considerare a probabile rischio per la salute. Infatti gran parte delle osservazioni epidemiologiche sulle quali si basa il criterio si riferiscono a tempi di esposizione compresi tra 4 e 8 ore. L'applicazione del criterio a tempi differenti deve essere estremamente cauta, in particolare nel caso di tempi di esposizione brevi, cui corrispondono elevate ampiezze della vibrazione ponderata. Il criterio, ai fini della valutazione degli effetti potenziali sulla salute, si applica alle singole componenti della vibrazione, considerate indipendentemente, nell'ipotesi che una sia dominante, in particolare la componente verticale.

## 2.2 La Direttiva Europea 2002/44/CE

La Direttiva 2002/44/CE propone come parametro di valutazione l'accelerazione ponderata media integrata su 8 ore  $A(8)$ , "espressa come l'accelerazione continua equivalente su 8 ore, calcolata come il più alto dei valori quadratici medi, o il più alto dei valori della dose di vibrazioni VDV, delle accelerazioni ponderate in frequenza, determinati sui tre assi ortogonali ( $1,4 a_{wx}$ ,  $1,4 a_{wy}$ ,  $a_{wz}$  per un lavoratore seduto o in piedi)".

La direttiva individua un **livello d'azione** di **0,5  $m/s^2$** , oppure, a seconda della scelta dello Stato membro, un valore della dose di vibrazioni di **9,1  $m/s^{1,75}$** , la soglia oltre il quale si debbono intraprendere iniziative di tutela e di prevenzione per i lavoratori esposti. In tal caso il datore di lavoro elabora e applica un programma di misure tecniche e/o organizzative, volte a ridurre al minimo l'esposizione alle vibrazioni meccaniche e i rischi che ne conseguono, nonché definiti protocolli sanitari da attuare periodicamente.

La direttiva fissa in **1,15  $m/s^2$** , oppure, a seconda della scelta dello Stato membro, a un valore della dose di vibrazioni di **21  $m/s^{1,75}$**  il **livello limite giornaliero**, intendendo come tale un livello di esposizione che non può essere superato. L'esposizione ad accelerazioni superiori al livello limite è vietata e deve essere prevenuta.

In base all'esame delle curve si può evincere come l'uso dei valori limite espressi in VDV (al posto dell' $A(8)$ ), per la verifica del livello di esposizione, può essere considerato più restrittivo, in quanto "matematicamente" sovrastimante. Solo in caso di particolari orari di lavoro, superiori alle 8 ore giornaliere, l'uso dei limiti in VDV è meno restrittivo (p.e. nel caso degli autisti di TIR). Per tempi di esposizione intorno alle 8 ore non si ha alcun effetto di sovrastima "matematica" (o sottostima).



Figura 3: ISO 2631-1 Le curve limiti di esposizione

Gli Stati membri hanno la facoltà di fissare dei valori limite o di azione, inferiori a quelli proposti, nonché di scegliere il parametro di valutazione tra l'A(8) ed il VDV. Tale scelta, che dovrà essere effettuata all'atto del recepimento della Direttiva, non può non far nascere degli spunti di discussione, anche alla luce delle risultanze della non "sovrapponibilità" tra le due diverse metodologie, come illustreremo in seguito con degli esempi applicativi. Tali esempi sono stati scelti tra quelli con tempi di esposizione pari ad 8 ore, per annullare l'effetto di sovrastima "matematico".

### 3. ESEMPI APPLICATIVI DI VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE PERSONALE

Sono state effettuate delle misure vibrometriche sul sedile di guida di un'autocisterna IVECO Magirus del 2001, regolarmente sottoposta a manutenzione.



Figura 4: Autocisterna IVECO Magirus



Figura 5: Modalità di installazione della strumentazione sul sedile di guida

Le misurazioni sono state effettuate nelle normali condizioni di lavoro, simulando le due tipologie di percorso più rappresentative:

- un percorso prevalentemente extraurbano che ha avuto una durata di circa 45' ed un tragitto pari a 38 Km, con una velocità media di 50 Km/h;
- un percorso prevalentemente urbano che ha avuto una durata di circa 30' ed un tragitto pari a 20 Km, con una velocità media di 40 Km/h.

L'accelerometro triassiale, del tipo ICP, e l'adattatore a cuscino, sono stati fissati sopra la seduta del sedile con del nastro adesivo e posizionati secondo il sistema di riferimento stabilito dallo standard ISO 2631-1. Anche lo strumento di registrazione delle vibrazioni (data logger) ed i cavi di collegamento sono stati fissati con nastro adesivo. I livelli di esposizione personale alle vibrazioni A(8), sono stati calcolati , utilizzando le relazioni:

$$A(8) = a_{\text{rms}} \sqrt{T_e} = \frac{1}{8} \int_0^{T_e} a_{\text{rms}}^2(t) dt = \left[ \frac{1}{8} \sum_{i=1}^N a_{\text{rms},i}^2 T_i \right]^{1/2} \left( \frac{m}{s^2} \right) \quad (3)$$

Per verificare la presenza di componenti impulsive va calcolato il Fattore di Cresta (CF), come rapporto tra il picco massimo ed il valore r.m.s. equivalente globale. Per **CF < 9**, la valutazione dell'esposizione mediante l'A(8) risulta efficace; per **CF > 9**, la norma ISO 2631-1 raccomanda

ulteriori indagini: il massimo della media mobile (MTVV Maximum Transient Vibration Value) o la dose della quarta potenza (VDV fourth power Vibration Dose Value), quest'ultima grandezza espressamente adottata dalla Direttiva 2002/44/CE. Nel caso in esame sono stati calcolati  $CF > 9$ , ascrivibili alla natura accidentata del percorso (presenza di buche, dossi, ecc.).

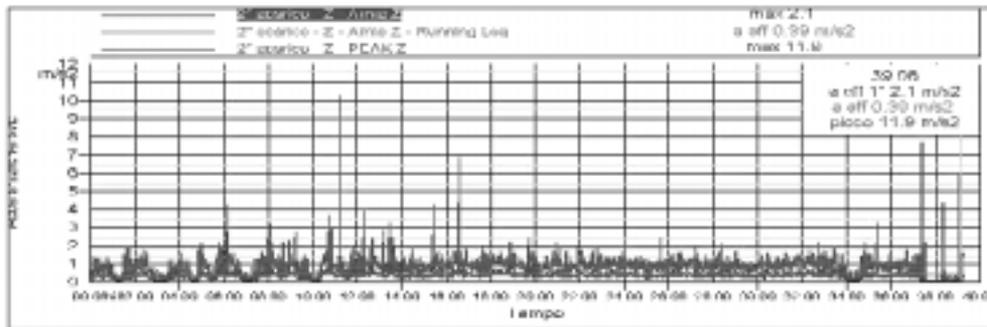


Figura 6: Misure su Autocisterna su percorso extraurbano

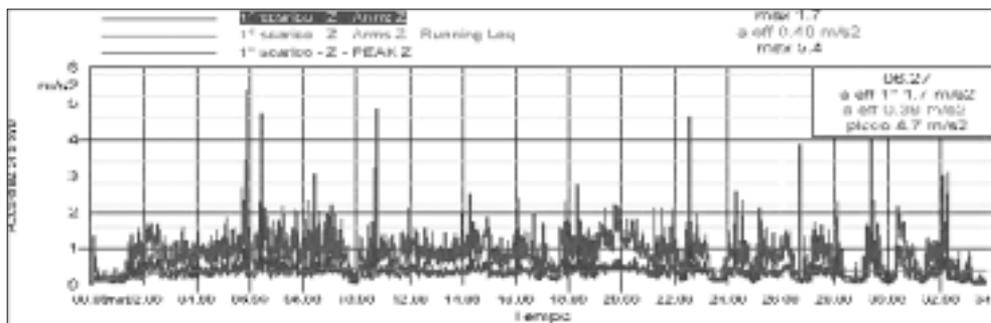


Figura 7: Misure su Autocisterna su percorso urbano

Per determinare in maniera quantitativa l'effetto delle componenti transitorie, è possibile pertanto calcolare il valore della dose della quarta potenza VDV.

$$VDV(s) = \left[ \int_0^s [a_w(t)]^4 dt \right]^{1/4} = \left[ \sum_{i=1}^n VDV_i^4 \right]^{1/4} \left( \frac{m}{s^{1/3}} \right) \quad (4)$$

nonché il rapporto tra il VDV misurato e quello teorico calcolato (estimated VDV):

$$eVDV = 1,4 a_w T_e^{1/4} \quad (5)$$

ovvero, come la ISO suggerisce, il rapporto  $VDV_{wz}/A_{wz}Te^{1/4}$ , che, qualora ecceda il valore **1,75**, conferma la necessità delle valutazioni aggiuntive.

Le risultanze confermano la natura transitoria delle vibrazioni in oggetto, in particolare per quanto concerne l'ambito extraurbano. Tale differenza è ascrivibile alla maggior velocità media impiegata nel tratto extraurbano, nonché al minor carico trasportato dall'autocisterna a seguito del primo scarico.

Tabella 1

*Riepilogo dei parametri misurati e calcolati*

Tipologia percorso	Te (min)	A <sub>wz</sub> (m/s <sup>2</sup> )	Peak <sub>max</sub> (m/s <sup>2</sup> )	CF	VDV <sub>wz</sub> (m/s <sup>1,75</sup> )	VDV <sub>wz</sub> (A <sub>wz</sub> T <sup>1/4</sup> )
Percorso extraurbano	480	0,39	10,44	<b>30,5</b>	<b>10,44</b>	<b>2,05</b>
Percorso urbano	480	0,40	8,63	<b>13,5</b>	8,63	1,66

Dall'esame dei parametri si può evincere come, nell'ipotesi di un orario di guida di 8 ore effettive su percorso extraurbano, mentre il valore di A(8) è inferiore alla soglia di azione, quello del VDV(8) è superiore e quindi potenzialmente a rischio.

#### 4. CONFRONTO TRA LE METODOLOGIE A(8) E VDV

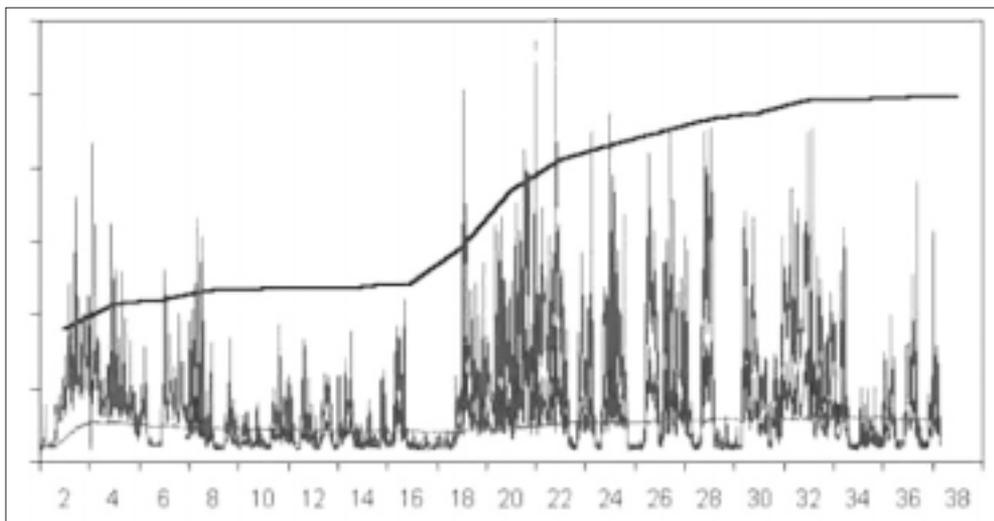


Figura 8: Grafico comparativo tra A<sub>wz</sub> e VDV<sub>wz</sub>

La Figura 8, relativa a misure vibrometriche sul sedile di guida di un'autovettura Y10, su percorso urbano, illustra chiaramente come A(8) sia un parametro medio di misura, mentre il VDV

è invece cumulativo. Inoltre si può evincere come il VDV risponda più rapidamente agli shock che l'A(8): l'A(8) rappresenta in modo ottimale i livelli di vibrazione stazionari, mentre il VDV rappresenta anche gli shock e gli urti.

Anche in questo secondo esempio applicativo sul posto di guida dell'autovettura Y10, si è riscontrato un valore di A(8) inferiore alla soglia di azione ed un valore di VDV superiore.

Tabella 2

Riepilogo dei parametri per autovettura Y10 (percorso urbano)

Tipologia percorso	Te (min)	Awz (m/s <sup>2</sup> )	Peak <sub>max</sub> (m/s <sup>2</sup> )	CF	VDV <sub>wz</sub> (m/s <sup>1,75</sup> )	VDV <sub>wz</sub> (AwzT <sup>1/4</sup> )
Percorso urbano	480	0,36	5,2	<b>14,4</b>	<b>9,35</b>	<b>1,99</b>

In base a questi esempi presentati, si può concludere che l'uso del VDV, per tempi di esposizione intorno alle 8 ore, per la verifica del livello di esposizione, può essere considerato più rappresentativo dell'A(8), in quanto considera anche la presenza di componenti impulsive.

Volendo considerare, più in generale, tempi di esposizione inferiori alle 8 ore, e tenendo presente inoltre l'effetto di sovrastima del VDV legato alla minore pendenza caratteristica della sue curve limiti (vedasi Figura 3), è stato riscontrato, in base alle esperienze effettuate ad oggi dagli Autori, che complessivamente il VDV sia ancora restrittivo. La sovrastima del VDV, però, non è costante, ma dipende da alcuni fattori aggiuntivi. Tra questi fattori possiamo citare il livello stesso delle vibrazioni e la presenza di forti componenti impulsive come: l'utilizzo di camion di vecchia concezione, senza la postazione di guida sospesa ed ammortizzata, di camion scarichi, le velocità di guida elevate, le condizioni della superficie stradale non ottimali, ecc.. In presenza di questi fattori, l'A(8) diventa sottostimante in modo significativo, l'effetto delle componenti impulsive diventa significativo e solo il VDV può dare la più rappresentativa valutazione del rischio.

## 5. CONCLUSIONI

Ci sono evidenze che le vibrazioni transitorie, gli shock e gli urti rappresentino un rischio per la salute, a livelli inferiori di quelli delle vibrazioni stazionarie corrispondenti (isoenergetiche), analogamente a quanto già riscontrato per il fenomeno acustico. Per la valutazione delle componenti impulsive il calcolo del solo Fattore di Cresta è chiaramente insufficiente, non permettendo la discriminazione tra la presenza occasionale di tali componenti e quella ricorrente.

Ad avviso degli autori, ed in base alle risultanze preliminari ad oggi emerse, l'uso del solo VDV può apparire più restrittivo, in quanto sovrastimante, per l'identificazione ed la valutazione dei rischi da vibrazioni (in caso di attività lavorative con tempi di esposizione inferiori alle 8 ore); di contro l'uso dell'A(8), in presenza di shock ed urti, è sicuramente sottostimante.

Pertanto il VDV potrà anche essere considerato idoneo, per la verifica del raggiungimento del livello di azione ai fini preventivi, e la conseguente predisposizione dei programmi di misure tecniche e/o organizzative, ma dovrà essere utilizzato con accortezza, per la valutazione del rischio ai fini assicurativi, alla luce delle considerazioni suesposte. E' opportuno che, in presenza di shock ed urti, la valutazione del rischio ai fini assicurativi venga effettuata utilizzando entrambi i parametri, A(8) e VDV, e considerando quello più rappresentativo nel caso specifico.

## BIBLIOGRAFIA

BRUEL & KJAER, Pocket Handbook: Noise, Vibration, Light, Thermal Comfort, 1986, B&K, Denmark.

BRUEL & KJAER: Human Body Vibration: Technical Review, 1982, B&K, Denmark.

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), nella GUCE L. 177 del 6.7.2002.

DROGICINA and RAZUMOV: "Vibration", Encyclopedia of Occupational Health and Safety, Vol. 2, 1972, McGraw-Hill Book Company, New York.

<http://www.hse.gov.uk/vibration/vdv.htm> (24/10/03).

<http://www.safetyline.wa.gov.au> (24/10/03).

INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION, ISO 2631-1:1997, Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration, Part 1, General Requirements, 1997, ISO, Switzerland.

ISPESL, Linee Guida ISPESL sull'esposizione professionale a rumore e vibrazioni, 2002, ISPESL, Italy.