

LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO VIBRAZIONI

INAIL

2019

COLLANA SALUTE E SICUREZZA



LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO VIBRAZIONI

INAIL

2019

Pubblicazione realizzata da

Inail

Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale

Coordinamento scientifico

Pietro Nataletti¹

Autori

Pietro Nataletti¹, Raffaele Sabatino², Angelo Tirabasso¹, Paolo Lenzuni³

Editing

Emanuela Giuli¹, Tiziana Ursicino¹

¹ Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale

² Inail - Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici

³ Unità operativa territoriale di Firenze

per informazioni

Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale

Via Fontana Candida, 1 - 00078 Monte Porzio Catone (RM)

dmil@inail.it; p.nataletti@inail.it

www.inail.it

©2019 Inail

ISBN 978-88-7484-172-1

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nelle pubblicazioni, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail.

Le pubblicazioni vengono distribuite gratuitamente e ne è quindi vietata la vendita nonché la riproduzione con qualsiasi mezzo. È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

INDICE

1. Introduzione	9
1.1 Gli agenti fisici	9
1.2 Il titolo VIII del d.lgs. 81/2008 e s.m.i.	10
2. Determinazione dell'esposizione al rischio vibrazioni	13
2.1 Definizioni	13
2.1.1 Le vibrazioni meccaniche	13
2.1.2 Il sistema mano-braccio	14
2.1.3 Il corpo intero	15
2.2 Descrittori di esposizione a vibrazioni	15
2.3 Valori soglia e misure di prevenzione	16
2.3.1 HAV	16
2.3.2 WBV	19
2.3.3 Deroghe	22
2.4 Percorsi	22
2.5 Misura dell'esposizione al sistema mano-braccio	24
2.5.1 La misura dell'accelerazione	24
2.5.2 Posizionamento ed orientamento del sensore	27
2.5.3 Numero delle misure	28
2.5.4 Durata delle misure	28
2.5.5 Calcolo dell'accelerazione ponderata	29
2.5.6 Il descrittore della vibrazione	29
2.5.7 Esposizione giornaliera	29
2.5.8 Periodi brevi	32
2.5.9 Metodo supplementare di misura per il rischio vascolare	32
2.6 Misura dell'esposizione al corpo intero	34
2.6.1 La misura dell'accelerazione	34
2.6.2 Posizionamento ed orientamento del sensore	37
2.6.3 Numero delle misure	38
2.6.4 Durata delle misure	38
2.6.5 Calcolo dell'accelerazione ponderata	38
2.6.6 Calcolo del valore totale della vibrazione	39
2.6.7 Esposizione giornaliera	39
2.6.8 Il descrittore della vibrazione	42
2.6.9 Periodi brevi	43
2.6.10 Metodi di misura alternativi	43
2.7 Informazioni fornite dal fabbricante	46
2.7.1 Conformità alla vecchia e alla nuova direttiva macchine	46
2.7.2 Indicazioni sulle HAV	48
2.7.3 Indicazioni sulle WBV	50

2.7.4	Periodi brevi	52
2.8	Banche dati vibrazioni (BDV)	52
2.8.1	Periodi brevi	53
2.9	Relazione tecnica di misura	53
2.10	Incertezza	54
3.	Il documento di valutazione del rischio	56
3.1	Le fasi della valutazione del rischio	56
3.2	La giustificazione del rischio	56
3.3	L'identificazione delle condizioni espositive da valutare	57
3.4	La quantificazione dell'esposizione	58
3.5	Altri elementi di cui tenere conto nella valutazione del rischio	59
3.6	Il programma delle misure tecniche e organizzative	59
3.7	I DPI 'antivibrazione'	61
3.7.1	I DPI per le HAV	61
3.7.2	I DPI per WBV	63
3.8	L'informazione e la formazione	65
3.9	La sorveglianza sanitaria	66
4.	Il controllo delle vibrazioni meccaniche delle macchine	67
4.1	Modello meccanico di un sistema ad un grado di libertà	67
4.2	La riduzione passiva delle vibrazioni meccaniche	68
4.3	La riduzione attiva delle vibrazioni meccaniche	70
5.	La corretta manutenzione	72
	Bibliografia e sitografia	75
	Riferimenti normativi	76
	Norme tecniche	78
	Acronimi	80
	Appendici	81
	Appendice A - Metodo della quarta potenza della dose di vibrazioni	83
	Appendice B - Metodo dei valori rms costanti	87
	Appendice C - Comfort	88
C.1	Generalità	88
C.2	HAV	88

C.3	WBV	88
C.3.1	Discomfort diretto	88
C.3.2	Discomfort indiretto	91
Appendice D - Male dei trasporti		92
D.1	Generalità	92
D.2	Valutazione	92
D.3	Limite di accettabilità	93
Appendice E - Paf		94
E.1	Generalità	94
E.2	La BDV mano-braccio	98
E.3	La BDV corpo-intero	99
Appendice F - Incertezza		102
F.1	Considerazioni generali	102
F.2	Incertezza associata al campionamento (uC)	103
F.2.1	Contributi all'incertezza sulla stima di accelerazione	103
F.2.2	Metodo che prevede l'esecuzione di misure in campo	104
F.2.3	Metodo che prevede il recupero delle informazioni nella BDV	107
F.2.4	Metodo che prevede l'uso delle informazioni fornite dal fabbricante	109
F.3	Incertezza associata alle caratteristiche della strumentazione (uS)	111
F.4	Incertezza associata al posizionamento e all'orientamento del sensore, e all'accoppiamento con il macchinario (uL)	112
F.5	Incertezza composta sul descrittore di accelerazione	113
F.6	Incertezza associata alla stima del tempo di esposizione (uT)	113
F.7	Incertezza sul descrittore di esposizione	114
F.8	Incertezza sul descrittore di vibrazione su Periodi brevi	115
F.9	Incertezza sul VDV	116
F.10	Incertezza estesa	117
F.11	Confronto con valori limite	117
Appendice G - Strumentazione		118
Appendice H - Esempi di calcolo dell'esposizione		122
H.1	HAV - Esposizione dovuta ad una sola lavorazione	122
H.2	HAV - Esposizione dovuta a diverse lavorazioni	124
H.2.1	Dettaglio delle lavorazioni	124
H.2.2	Calcolo dell'esposizione	125
H.3	WBV Esposizione dovuta ad una sola lavorazione	126
H.4	WBV Esposizione dovuta a diverse lavorazioni	129
H.4.1	Dettaglio delle lavorazioni	129
H.4.2	Calcolo dell'esposizione	129
H.5	WBV Esposizione a vibrazioni impulsive	131

PREFAZIONE

L'esposizione professionale a vibrazioni meccaniche può presentare rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori, se non è correttamente valutata e se non vengono messe in atto, da parte del datore di lavoro per il tramite del Servizio di prevenzione e protezione, tutte le misure tecniche di prevenzione e protezione consentite dallo stato dell'arte e tutte le misure organizzative concretamente attuabili nel posto di lavoro.

In Italia l'esposizione professionale a vibrazioni meccaniche è stata regolamentata per la prima volta dal d.lgs. 187/2005 di attuazione della direttiva vibrazioni 2002/44/CE. Il d.lgs. 187/2005 è stato successivamente incorporato all'interno del d.lgs. 81/2008, nel quale compare come Capo III del Titolo VIII sulla protezione dei lavoratori dai rischi di esposizione a vibrazioni meccaniche, e risultando integrato dall'Allegato Tecnico XXXV. Parallelamente, il Coordinamento tecnico interregionale della prevenzione nei luoghi di lavoro e l'Inail hanno pubblicato le Indicazioni operative per la corretta applicazione del Titolo VIII del d.lgs. 81/2008, tra cui anche il Capo III. Ciò nonostante, numerosi aspetti tecnici e metodologici riguardanti la corretta valutazione del rischio vibrazioni, sono rimasti aperti e richiedono ancora oggi una risposta.

Il Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale dell'Inail ha voluto realizzare, a tale riguardo, questa pubblicazione per fornire ai datori di lavoro, ai responsabili del servizio di prevenzione e protezione e in generale a tutti coloro che si occupano di prevenzione nei luoghi di lavoro, un documento operativo di sintesi sulle attuali conoscenze nazionali e internazionali per consentire loro di valutare nel migliore dei modi i rischi legati all'esposizione alle vibrazioni meccaniche, sia quelle trasmesse al sistema mano-braccio che quelle trasmesse al corpo intero. In particolare vengono date indicazioni operative dettagliate sulla corretta metodologia di valutazione del rischio vibrazioni per ciascuno dei tre 'percorsi' previsti dall'art. 202 del d.lgs. 81/2008 che utilizzano, alternativamente, i dati di certificazione dei costruttori, le banche dati o le misurazioni. Per ognuno di questi percorsi è inoltre definito un metodo per il calcolo dell'incertezza associata alla stima dei descrittori di rischio. Indicazioni tecniche per la riduzione del rischio e un'ampia casistica di esempi completano il documento.

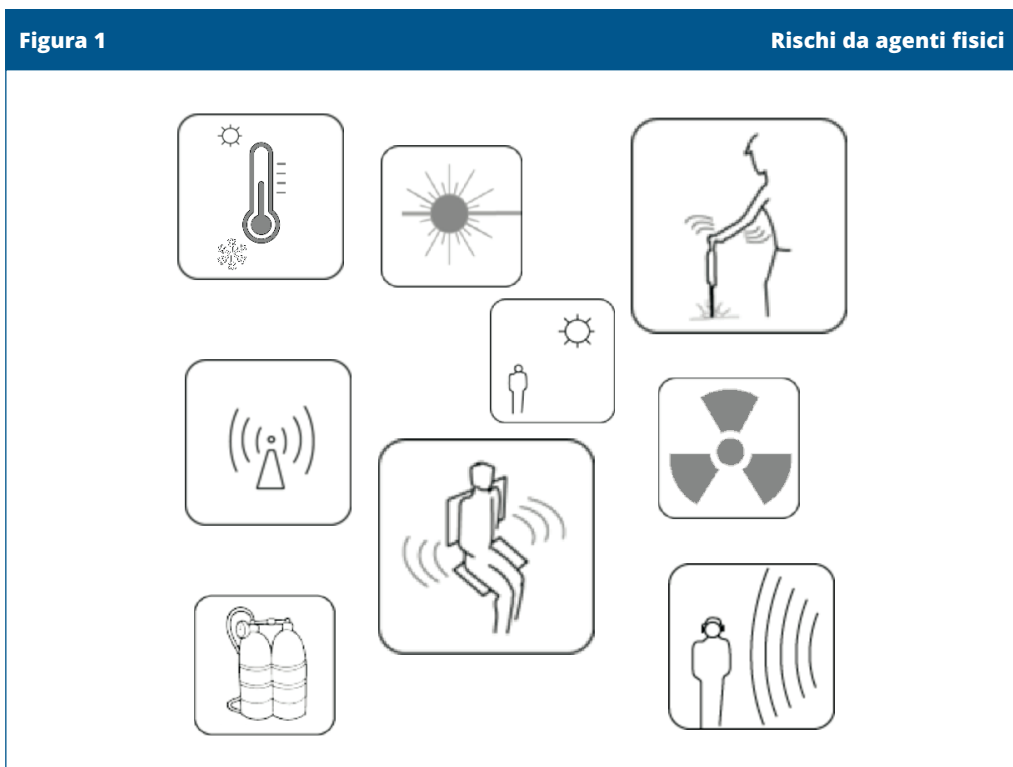
Sergio Iavicoli

*Direttore del Dipartimento di medicina,
epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale*

1. INTRODUZIONE

1.1 GLI AGENTI FISICI

Gli agenti fisici (Figura 1) rappresentano dei fattori, governati da leggi fisiche, che provocano una trasformazione delle condizioni ambientali nelle quali essi si manifestano. La loro presenza determina un'immissione di energia, negli ambienti di vita e di lavoro, che, oltre i valori tollerati, risulta potenzialmente dannosa per la salute umana.



<https://www.portaleagentifisici.it>

I rischi derivanti da agenti fisici nell'ambiente lavorativo debbono essere rimossi, o ridotti il più possibile, attraverso le seguenti azioni:

- corretta progettazione e pianificazione dei processi lavorativi sul luogo di lavoro;
- riduzione della presenza di agenti fisici nell'ambiente di lavoro in base alle necessità lavorative;

- diminuzione della durata e dell'intensità di esposizione;
- restrizione al minimo del numero dei lavoratori potenzialmente esposti;
- corretta formazione ed informazione dei lavoratori;
- somministrazione di attrezzature adeguate alla specifica attività e indicazione delle relative procedure di manutenzione;
- determinazione di idonee misure tecnico-organizzative.

L'esposizione in ambiente lavorativo ad agenti di rischio di tipo fisico coinvolge in Italia milioni di lavoratori. Dati recenti, reperibili dal sistema di sorveglianza delle malattie professionali, MalProf, evidenziano come una quota consistente delle malattie di probabile origine professionale, nell'ultimo triennio, siano riconducibili all'esposizione ad agenti fisici.

1.2 IL TITOLO VIII DEL D.LGS. 81/2008 E S.M.I.

I rischi fisici contemplati nel Testo unico della sicurezza (d.lgs. 81/2008 e s.m.i., Titolo VIII 'Agenti fisici') riguardano il rumore, le vibrazioni meccaniche, i campi elettromagnetici, le radiazioni ottiche di origine artificiale, il microclima, gli infrasuoni, gli ultrasuoni e le atmosfere iperbariche (vedi Tabella 1).

Tabella 1		Riferimenti legislativi dei vari agenti fisici	
Agenti fisici	Riferimenti legislativi		
Rumore	d.lgs. 81/2008 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I; Titolo VIII, Capo II)		
Vibrazioni	d.lgs. 81/2008 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I; Titolo VIII, Capo III)		
Campi elettromagnetici	d.lgs. 81/2008 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I; Titolo VIII, Capo IV)		
Radiazioni ottiche artificiali	d.lgs. 81/2008 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I; Titolo VIII, Capo V)		
Microclima, infrasuoni, ultrasuoni, atmosfere iperbariche	d.lgs. 81/2008 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I)		

Come si può notare, alcuni agenti fisici (microclima, ultrasuoni, infrasuoni e atmosfere iperbariche) non dispongono di un proprio capo specifico. Il datore di lavoro (DL) è comunque tenuto alla loro valutazione del rischio, secondo quanto stabilito dall'art. 28 e, più nello specifico, dall'art.181. In base allo stesso obbligo generale di valutazione di tutti i rischi, vengono ricompresi nel Testo unico anche agenti di rischio fisici non esplicitamente citati, come le radiazioni ottiche naturali. Per quanto riguarda, invece, le radiazioni ionizzanti, il d.lgs. 81/2008 rimanda al d.lgs. 230/1995 e s.m.i.

La valutazione del rischio di un agente fisico, come previsto dall'art. 28 e in particolare, per gli agenti fisici, dal Titolo VIII, va fondamentalmente intesa come una sezione del più

generale documento di valutazione dei rischi per la salute e la sicurezza (DVR), unitamente alla relazione tecnica redatta da *personale qualificato*¹, comprensiva di eventuali misurazioni, da tenersi in azienda in vista della programmazione e dell'attuazione delle misure di prevenzione e protezione e, ovviamente, a disposizione degli organi di vigilanza.

Il DVR dovrà, pertanto, riportare le misure di prevenzione e protezione in essere ed indicare il programma delle misure atte a garantire nel tempo il miglioramento dei livelli di salute e sicurezza, con le relative procedure aziendali e dei ruoli dell'organizzazione che vi debbono provvedere, a cui debbono essere assegnati soggetti in possesso di adeguate competenze e poteri.

Nella valutazione del rischio di ogni agente fisico vanno indicati i seguenti elementi:

- la data certa di esecuzione della valutazione dell'agente fisico, con eventuali misurazioni;
- i dati identificativi del *personale qualificato* che ha provveduto alla valutazione;
- i dati identificativi del medico competente (MC), se previsto ai sensi degli artt. 41 e 185, e del responsabile del servizio di prevenzione e protezione (RSPP) che hanno partecipato alla valutazione del rischio;
- i dati identificativi del rappresentante dei lavoratori per la sicurezza (RLS) o, ove assente, dei lavoratori, consultati ai sensi dell'art. 50, comma 1, e delle modalità della relativa consultazione e informazione;
- i dati identificativi delle relazioni tecniche da allegare (es. data, estremi del protocollo, numero di pagine, ecc.).

A norma dell'art. 181, comma 2, la valutazione dei rischi derivanti da esposizioni ad agenti fisici è programmata ed effettuata, con cadenza almeno quadriennale, oltreché aggiornata in occasione di modifiche del processo produttivo o della organizzazione del lavoro significative ai fini della salute e sicurezza dei lavoratori.

Per tutti gli agenti fisici, l'esposizione deve essere eliminata alla fonte o ridotta al minimo ed in nessun caso i lavoratori devono essere esposti a valori superiori ai valori limite di esposizione (laddove definiti negli specifici Capi). Qualora, nonostante i provvedimenti presi, suddetti valori risultino superati, il datore di lavoro deve adottare un programma di misure tecniche ed organizzative che eviti nuovi superamenti.

Sussiste in ogni caso anche l'obbligo, di cui all'art.184, di provvedere affinché i lavoratori esposti a rischi derivanti da agenti fisici sul luogo di lavoro, e i loro rappresentanti, vengano informati e formati in relazione al risultato della valutazione dei rischi. Tale obbligo assume particolare rilevanza nel caso dei lavoratori particolarmente sensibili al rischio ove una corretta informazione può condurre il lavoratore a formulare motivata richiesta di sorveglianza sanitaria come previsto dall'art. 41.

¹ Si definisce *personale qualificato* un operatore in possesso di esperienza specifica nel settore o di conoscenze specifiche acquisite, ad esempio, attraverso la partecipazione a specifici corsi di formazione; in assenza di ulteriori specifiche è possibile valutare l'operato del valutatore in base alla qualità dell'elaborato prodotto e in base all'aderenza alle normative cogenti e di buona tecnica.

Il presente documento affronta tutti i diversi aspetti della valutazione del rischio declinati al caso specifico del rischio da vibrazioni meccaniche. In particolare:

- nel capitolo 2 vengono inizialmente identificati gli elementi cardine del tema (articolazione mano-braccio / corpo intero, descrittori di esposizione, valori soglia di legge), e successivamente vengono discussi i metodi con i quali giungere ad una stima quantitativa dell'esposizione e della relativa incertezza;
- nel capitolo 3 vengono passati in rassegna tutti gli elementi rilevanti nella redazione del documento di valutazione del rischio (giustificazione del rischio, programma delle misure tecniche, dispositivi di protezione individuali (DPI), formazione, informazione, ecc.);
- nel capitolo 4 vengono illustrati alcuni aspetti relativi al controllo delle vibrazioni meccaniche generate da macchinari di varie tipologie;
- nel capitolo 5 vengono descritti i principali elementi relativi alla manutenzione delle macchine sorgenti di vibrazioni.

2. DETERMINAZIONE DELL'ESPOSIZIONE AL RISCHIO VIBRAZIONI

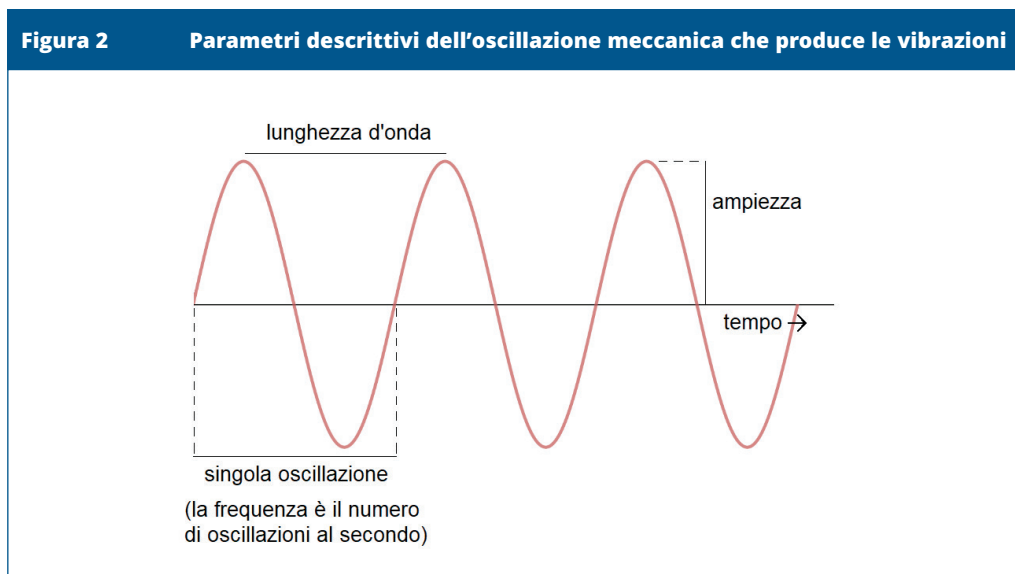
2.1 DEFINIZIONI

2.1.1 Le vibrazioni meccaniche

Le vibrazioni sono oscillazioni meccaniche rispetto ad un punto di riferimento, determinate da onde di pressione che si trasmettono generalmente attraverso corpi solidi; le oscillazioni caratteristiche delle vibrazioni possono essere libere o forzate, ossia influenzate da una forza esterna come nel caso dell'utilizzo di strumenti da parte di un lavoratore.

Il termine vibrazione si riferisce in particolare ad una oscillazione meccanica, attorno ad un punto d'equilibrio, potendosi distinguere i seguenti parametri (Figura 2):

- frequenza (f): numero di cicli completi nell'unità di tempo;
- periodo (T): intervallo di tempo necessario per completare un ciclo (reciproco della frequenza);
- lunghezza d'onda (λ): spazio percorso dall'onda in un periodo;
- ampiezza (A): ampiezza dell'onda;
- velocità di propagazione (c_s): velocità alla quale l'onda si sposta nel mezzo in cui si propaga.



(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

Nel contesto del loro potenziale impatto sulla salute dei soggetti lavorativamente esposti, le vibrazioni vengono tipicamente quantificate mediante la quantità cinematica 'accelerazione'. Due elementi cardine dell'accelerazione sono rappresentati dalla frequenza e dall'intensità. La frequenza, descritta in precedenza, è espressa in Hertz (Hz), mentre l'intensità è solitamente definita in base al valore quadratico medio (*root mean square* o r.m.s.) dell'ampiezza, ed è espressa in m/s^2 . Le intensità e soprattutto le frequenze delle vibrazioni possono essere molto diverse a seconda della sorgente che le produce (Figura 3).



<https://www.portaleagentifisici.it>

L'analisi dell'esposizione professionale a vibrazioni avviene con modalità distinte in funzione del distretto interessato. In particolare vanno valutate indipendentemente:

- le vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio o HAV (acronimo dell'inglese *hand-arm vibration*);
- le vibrazioni trasmesse al sistema corpo intero o WBV (acronimo dell'inglese *whole body vibration*).

2.1.2 Il sistema mano-braccio

Per vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio si intendono *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* (d.lgs. 81/2008, art. 200 comma 1, lettera a). L'insieme di tali disturbi è noto con il termine 'sindrome da vibrazioni mano-braccio'.

L'esposizione a questo tipo di vibrazioni si riscontra in lavorazioni nelle quali si impugnano utensili vibranti quali martelli demolitori, decespugliatori, motoseghe, smerigliatrici, scalpellatori e attrezzature sottoposte a vibrazioni e/o impatti. L'esposizione a vibrazioni, in questo caso, è causata dal contatto delle mani con l'impugnatura di

Se il rischio di esposizione a vibrazioni meccaniche è elevato, il datore di lavoro deve adottare misure di prevenzione e protezione per ridurre il rischio di esposizione a vibrazioni meccaniche.

Tabella 2 Malattie professionali da agenti fisici denunciate all'Inail nel periodo 2012-2017						
Malattia	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Sindrome del tunnel carpale (Movimenti ripetuti + postura + forza + HAV)	5.363	5.823	6.224	6.201	6.547	6.117
Ernia discale lombare (Movimentazione manuale dei carichi + WBV)	3.667	4.383	5.706	6.388	5.979	5.740
Ipoacusia da rumore e trauma acustico	4.551	4.627	4.715	4.743	4.757	4.539
Sindrome di Raynaud (HAV)	197	194	173	172	190	136
Malattie dell'occhio (Radiazioni ionizzanti + Radiazioni ottiche)	113	109	105	101	113	100

(Settori lavorativi: Industria e Servizi, Agricoltura, Dipendenti Conto Stato)

2.1.3 Il corpo intero

Per vibrazioni trasmesse al corpo intero si intendono *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* (d.lgs. 81/2008, art. 200 comma 1, lettera b).

L'esposizione a questo tipo di vibrazioni si riscontra in lavorazioni a bordo di mezzi di movimentazione usati in industria e in agricoltura, mezzi di trasporto e, in generale, macchine industriali vibranti (gru, autogru, trattori, ruspe, carrelli elevatori, ecc.). L'esposizione a vibrazioni è tipicamente associata alla guida del mezzo e quindi avviene mediante il contatto con il sedile. L'intervallo di frequenza rilevante è 1 - 80 Hz.

Con riferimento alla Tabella 2, sono evidenziati in verde i dati di alcune patologie dovute a vibrazioni meccaniche trasmesse al corpo intero come fattore causale o concausale.

2.2 DESCRITTORI DI ESPOSIZIONE A VIBRAZIONI

La valutazione del rischio derivante da vibrazioni contiene come elemento centrale la determinazione dell'esposizione cui sono soggetti tutti i lavoratori che utilizzano mac-

chine o attrezzature che producono vibrazioni interessanti il sistema mano-braccio o il corpo intero.

Il d.lgs. 81/2008 prevede, all'art. 201, due descrittori dell'esposizione a vibrazioni:

- a) un descrittore di breve periodo. Nel d.lgs. 81/2008 non compare il nome di questo descrittore. Nel seguito esso verrà indicato come *esposizione su periodi brevi*. Nel d.lgs. 81/2008 non compare neppure una quantificazione della durata di questi 'periodi brevi'. Si fa pertanto riferimento alle proposte di direttiva 93/C77/02 e 94/C230/03, che hanno originariamente introdotto questo descrittore, le quali utilizzavano a questo proposito la dizione *in pochi minuti*. La stima dell'esposizione su periodi brevi verrà discussa al punto 2.5.8 per le HAV e al punto 2.6.9 per le WBV;
- b) un descrittore di lungo periodo detto A(8). Il descrittore A(8) fornisce una stima dell'energia a cui viene esposto il lavoratore, cumulata nell'intera giornata lavorativa. Ad eccezione del caso (assai raro) in cui si esegua una misura relativa all'intera giornata lavorativa, poiché A(8) è sostanzialmente una dose, per il calcolo di questo descrittore è necessario disporre sia di una stima delle accelerazioni associate alle vibrazioni nelle diverse attività eseguite, sia di una stima dei rispettivi tempi di esposizione. La stima dei tempi di esposizione può essere eseguita con metodi sostanzialmente analoghi a quelli utilizzati nel contesto dell'esposizione professionale a rumore (vedi i punti 2.5.3 per le HAV e 2.6.7 per le WBV). Riguardo alla stima dell'accelerazione, esistono diverse possibilità, che verranno illustrate nella sezione 2.4.

2.3 VALORI SOGLIA E MISURE DI PREVENZIONE

2.3.1 HAV

La normativa fissa un valore di esposizione che fa scattare l'azione, al di sopra del quale i datori di lavoro devono controllare i rischi derivanti dalle HAV cui sono esposti i loro dipendenti, e un valore limite di esposizione che non deve essere superato. Tuttavia, livelli di esposizione di valore inferiori a quello che fa scattare l'azione non escludono rischi di lesioni o traumi indotti da HAV, soprattutto se in presenza di importanti cofattori di rischio, quali elevate forze di prensione o di spinta, sforzo muscolare, basse temperature, o in presenza di soggetti particolarmente suscettibili al rischio. Tali fattori che concorrono ad incrementare il rischio espositivo non sono presi in considerazione nella semplice valutazione del livello di esposizione ma devono essere obbligatoriamente considerati nella valutazione del rischio, come sarà illustrato nel capitolo 3. È da considerare, inoltre, che la normativa impone ai datori di lavoro l'obbligo, in sede di valutazione del rischio, di considerare la possibilità di eliminare o di ridurre, per quanto possibile, i rischi associati alle vibrazioni trasmesse all'arto superiore, anche se non sono superati i valori di azione. Il superamento dei valori di azione implica invece l'obbligo di attuazione di ulteriori specifiche misure di tutela per i lavoratori esposti.

Per le HAV il d.lgs. 81/2008 e s.m.i. ssa all'art. 201 i seguenti valori sogliati

Nella Tabella 3:

Tabella 3		Vibrazioni trasmesse al mano-braccio (HAV)
Valore d'azione giornaliero	Valore limite di esposizione giornaliero	
A(8) = 2,5 m/s ²	A(8) = 5 m/s ² a _{hvr} = 20 m/s ² (su periodi brevi)	

- il Valore d'azione giornaliero (VA) è il valore oltre il quale il DL ha l'obbligo di attuare l'informazione e la valutazione del rischio e, se necessario, la riduzione del rischio,
- il Valore limite di esposizione giornaliero (VLE) è il valore oltre il quale l'esposizione è vietata.

Il valore limite sui *periodi brevi*, è un valore che può essere tollerato solo per tempi contenuti e non deve essere superiore al 20% del VLE (20 m/s²).

Tabella 4

Classi di rischio e misure di prevenzione (HAV)

Classi di rischio	Sintesi delle misure di prevenzione
$A(8) \leq 2,5 \text{ m/s}^2$	<p style="text-align: center;">Informazione e formazione</p> <p>È opportuno fornire adeguata informazione e formazione generale: sugli esiti della valutazione del rischio vibrazioni, sulle misure di controllo adottate volte ad eliminare o ridurre i rischi derivanti da vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio; sulle condizioni di suscettibilità individuale; sui fattori che concorrono ad incrementare il rischio; sulle misure aziendali messe in atto per controllare il rischio (artt. 36 - 37). È necessario sempre valutare la possibilità di incremento del rischio dovuto a lavorazioni che comportino: elevate forze di pressione o di spinta, elevato sforzo muscolare, sovraccarico degli arti, freddo. Ulteriori misure di tutela e di riduzione dell'esposizione potrebbero essere necessarie qualora la valutazione del rischio evidenzi la presenza di detti cofattori di rischio, o in presenza di soggetti particolarmente sensibili al rischio</p>
$2,5 < A(8) \leq 5 \text{ m/s}^2$ e $a_{hv} \leq 20 \text{ m/s}^2$	<p style="text-align: center;">Informazione e formazione</p> <p>Oltre a quanto previsto per la classe di rischio $A(8) \leq 2,5 \text{ m/s}^2$, va fornita adeguata informazione e formazione dei lavoratori esposti sull'uso corretto e sicuro delle attrezzature di lavoro e dei DPI, in modo da ridurre al minimo la loro esposizione</p> <p style="text-align: center;">Misure tecniche organizzative</p> <p>Va redatto e applicato un programma di misure tecniche o organizzative, volte a ridurre al minimo l'esposizione e i rischi che ne conseguono</p> <p style="text-align: center;">Sorveglianza sanitaria</p> <p>I lavoratori esposti a livelli di vibrazioni superiori ai valori d'azione vanno sottoposti alla sorveglianza sanitaria, come disposto dall'art. 204. La sorveglianza viene effettuata periodicamente, di norma una volta l'anno o con periodicità diversa decisa dal MC. L'organo di vigilanza, con provvedimento motivato, può disporre contenuti e periodicità della sorveglianza diversi rispetto a quelli forniti dal MC</p>
$A(8) > 5 \text{ m/s}^2$ o $a_{hv} > 20 \text{ m/s}^2$	<p style="text-align: center;">Rischio inaccettabile</p> <p>Vanno prese misure immediate per riportare l'esposizione al di sotto di tale valore e saranno individuate le cause del superamento e adattate di conseguenza le misure di protezione e prevenzione per evitare un nuovo superamento (ad es. sostituzione immediata della macchina/attrezzo/apparecchiatura o riduzione dei tempi di esposizione)</p>

È possibile valutare il rischio di vibrazioni trasmesse al corpo intero (WBV) utilizzando il metodo di valutazione del rischio di vibrazioni (WBV) descritto nel capitolo 2.3.2.

2.3.2 WBV

Il metodo di valutazione del rischio di vibrazioni (WBV) è descritto nel capitolo 2.3.2. Il metodo di valutazione del rischio di vibrazioni (WBV) è descritto nel capitolo 2.3.2.

Tabella 5 Vibrazioni trasmesse al corpo intero (WBV)	
Valore d'azione giornaliero	Valore limite di esposizione giornaliero
$A(8) = 0,5 \text{ m/s}^2$	$A(8) = 1,0 \text{ m/s}^2$ $a_v = 1,5 \text{ m/s}^2$ (su periodi brevi)

Nella Tabella 5:

- il **valore d'azione giornaliero (VA)** è il valore oltre il quale il DL ha l'obbligo di attuare una serie di misure a tutela dei lavoratori esposti, quali la riduzione del rischio, l'informazione e l'attivazione della sorveglianza sanitaria,
- il **valore limite di esposizione giornaliero (VLE)** è il valore oltre il quale l'esposizione è vietata.

Come chiarito nel successivo punto 2.6.9, in base al principio di precauzione il valore limite di esposizione sui *periodi brevi* a_v va inteso come valore tri-assiale. Il valore limite su periodi brevi consente di riproporre una tutela, prevista dalle prime versioni della direttiva comunitaria sulle vibrazioni, ed in particolare le proposte di direttiva 93/C77/02 e 94/C230/03, volta a limitare le assunzioni brevi e violente di energia che il descrittore A(8) non impedisce.

Il confronto dei descrittori di esposizione con i valori soglia di legge individua delle classi di rischio con le conseguenti misure di prevenzione da adottare (ai sensi degli artt. 182 e 203 del d.lgs. 81/2008). La Tabella 6 riporta le suddette misure di prevenzione per le vibrazioni trasmesse al corpo intero (WBV).

Anche per le WBV, come per le HAV, la vigente normativa prescrive che la valutazione del rischio da esposizione a vibrazioni prenda in esame: 'il livello, il tipo e la durata dell'esposizione, ivi inclusa ogni esposizione a vibrazioni intermittenti o a urti ripetuti'. A differenza di quanto avviene per HAV, nel caso di WBV la comunità scientifica ha sviluppato metodi integrativi specifici per la valutazione di vibrazioni con forte contenuto impulsivo. Tali metodi sono inseriti all'interno di normative tecniche nazionali (UNI ISO 2631-1) o di standard internazionali (ISO 2631-5) e verranno discussi al punto 2.6.10. Nessuno di tali metodi integrativi compare nel d.lgs. 81/2008. Tuttavia il metodo detto VDV (acronimo dall'inglese *vibration dose value*) compare nella direttiva 2002/44/CE che ne specifica anche i relativi VA e VLE.

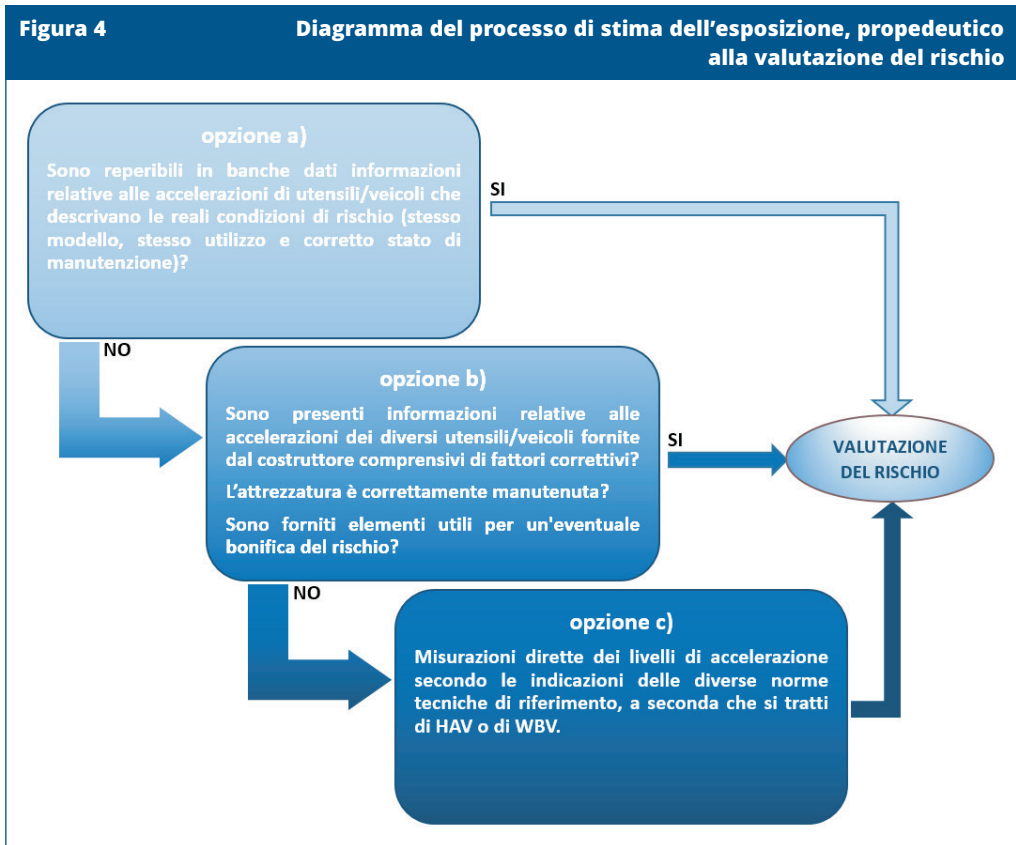
Tabella 6		Classi di rischio e misure di prevenzione (WBV)
Classi di rischio	Sintesi delle misure di prevenzione	
$A(8) \leq 0,5 \text{ m/s}^2$	<p style="text-align: center;">Informazione e formazione</p> <p>È opportuno fornire adeguata informazione e formazione generale sugli esiti della valutazione del rischio vibrazioni, sulle misure di controllo adottate, volte ad eliminare o ridurre i rischi derivanti da vibrazioni trasmesse al corpo; sulle condizioni di suscettibilità individuale; sui fattori che concorrono ad incrementare il rischio; sulle misure aziendali messe in atto per controllare il rischio (artt. 36 - 37)</p> <p>È necessario sempre valutare la possibilità di incremento di rischio dovuto a l'esposizione a vibrazioni in presenza di altri cofattori di rischio quali posture incongrue, sovraccarico meccanico, impulsi ripetuti o fattori di suscettibilità individuale. Ulteriori misure di tutela e di riduzione dell'esposizione potrebbero essere necessarie qualora la valutazione del rischio evidenzi la presenza di detti cofattori di rischio, o in presenza di soggetti particolarmente sensibili al rischio</p>	
$0,5 < A(8) \leq 1,0 \text{ m/s}^2$ e $a_v \leq 1,5 \text{ m/s}^2$	<p style="text-align: center;">Informazione e formazione</p> <p>Oltre a quanto previsto per la classe di rischio $A(8) \leq 2,5 \text{ m/s}^2$, va fornita adeguata informazione e formazione dei lavoratori esposti sull'uso corretto e sicuro delle attrezzature di lavoro e di specifici dispositivi di protezione, in modo da ridurre al minimo la loro esposizione</p> <p style="text-align: center;">Misure tecniche organizzative</p> <p>Deve essere predisposto e applicato un programma di misure tecniche o organizzative, volto a ridurre al minimo l'esposizione e i rischi che ne conseguono</p> <p style="text-align: center;">Sorveglianza sanitaria</p> <p>I lavoratori esposti a livelli di vibrazioni superiori ai valori d'azione sono sottoposti alla sorveglianza sanitaria, come disposto dall'art. 204</p> <p>La sorveglianza viene effettuata periodicamente, di norma una volta l'anno o con periodicità diversa decisa dal MC</p> <p>L'organo di vigilanza, con provvedimento motivato, può disporre contenuti e periodicità della sorveglianza diversi rispetto a quelli forniti dal MC</p>	
$A(8) > 1,0 \text{ m/s}^2$ o $a_v > 1,5 \text{ m/s}^2$	<p style="text-align: center;">Rischio inaccettabile</p> <p>Vanno prese misure immediate per riportare l'esposizione al di sotto di tale valore e saranno individuate le cause del superamento e adattate di conseguenza le misure di protezione e prevenzione per evitare un nuovo superamento (ad es. sostituzione immediata della macchina/attrezzo/apparecchiatura o riduzione dei tempi di esposizione)</p>	

Sebbene il d.lgs. 81/2008, con l'art. 205, consenta al DL di richiedere una deroga al rispetto dei citati VLE in alcune particolari condizioni, non si ritiene utile soffermarsi su tale aspetto nel presente documento, per due motivi in particolare. Il primo, perché sarebbe poi quantomeno doveroso, nei confronti del lettore, proporre una metodica/procedura per poter richiedere la concessione di tale deroga (condizione assai remota e quindi poco 'standardizzabile'). Il secondo, perché alcuni requisiti stabiliti dall'articolo 205 (in particolare al comma 2) risultano essere piuttosto ambigui e pertanto difficilmente documentabili.

2.4 PERCORSI

Il d.lgs. 81/2008 prevede, all'art. 202 comma 2, la possibilità che l'accelerazione prodotta da un utensile/veicolo venga stimata per tre diverse vie:

- a) **Misure.** L'esecuzione di misure di accelerazione, ed il successivo calcolo del descrittore di esposizione A(8), verrà discussa nella sezione 2.5 per le HAV e nella sezione 2.6 per le WBV. Nella stessa sezione 2.6 verranno anche brevemente presentati metodi integrativi per la quantificazione di vibrazioni con forte contenuto impulsivo. Infine nell'Appendice G verranno illustrate le caratteristiche richieste alla strumentazione di misura.
- b) **Informazioni fornite dal costruttore delle attrezzature.** L'utilizzo dei dati forniti dal fabbricante verrà discusso nella sezione 2.7.
- c) **Informazioni reperite in banche dati.** L'utilizzo delle banche dati verrà discusso nella sezione 2.8.



(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

Sulla base dell'interpretazione resa dal Coordinamento tecnico delle Regioni e delle Province autonome, si può stabilire che la procedura da seguire su questo tema sia la seguente:

- a) si ricercano, all'interno di una banca dati, le informazioni relative alle accelerazioni dei diversi utensili/veicoli. I dati possono essere utilizzati a patto che essi descrivano le reali condizioni di rischio relativamente a:
 - modello e utilizzo dell'attrezzatura;
 - manutenzione dell'attrezzatura;
 - disponibilità di tutti gli elementi utili per una eventuale bonifica del rischio.
- b) Qualora l'opzione a) non sia percorribile, si utilizzano le informazioni relative alle accelerazioni dei diversi utensili/veicoli fornite dal costruttore. I dati possono essere utilizzati a patto che:
 - siano disponibili fattori correttivi (se richiesti);

- l'attrezzatura sia in buone condizioni di manutenzione;
 - essi contengano gli elementi utili per una eventuale bonifica del rischio.
- c) Qualora né l'opzione a) né l'opzione b) risultino percorribili, vanno eseguite misure. In quanto 'metodo di riferimento', va fatto ricorso a misure in tutti i casi dubbi o controversi o che abbisognano di particolare precisione nel calcolo dell'esposizione, ed in generale nei casi elencati nel documento del Coordinamento tecnico delle Regioni e Province autonome e di seguito riportati:
- situazioni espositive nelle quali, non potendo giustificare, non sono disponibili né dati pertinenti in BDV né valori forniti dal fabbricante;
 - attrezzature di lavoro per le quali i dati del fabbricante siano in palese disaccordo (ed in particolare sottostimano) con i dati misurati riportati in BDV;
 - attrezzature di lavoro i cui libretti di istruzione riportino valori di accelerazione senza riferirsi ad alcuna normativa CEN o ISO non pertinente al macchinario stesso;
 - contenziosi sull'attendibilità dei livelli di esposizione;
 - valutazione dei livelli di esposizione per indagini su presunte malattie professionali.

Il suddetto documento afferma anche che *la misurazione delle vibrazioni serve anche per verificare se il programma di manutenzione del parco macchine (es.: sedili, ammortizzatori, attrezzi di lavoro collegati) è efficace e nel caso ridefinirne programmazione e specificità.*

La Figura 4 sintetizza la procedura sopra illustrata.

2.5 MISURA DELL'ESPOSIZIONE AL SISTEMA MANO-BRACCIO

2.5.1 La misura dell'accelerazione

Ai sensi del d.lgs. 81/2008, Appendice XXXV parte A, sia la misura dell'accelerazione associata alle vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio (HAV) che il successivo calcolo dei descrittori di esposizione, devono essere eseguiti in accordo con quanto prescritto dagli standard ISO 5349-1:2001 e ISO 5349-2:2001 (attualmente recepiti in Italia come UNI EN ISO 5349-1:2004 e UNI EN ISO 5349-2:2015)².

Qualora si proceda alla misurazione è importante tener conto dei seguenti aspetti:

- a) i metodi utilizzati possono includere la campionatura, purché sia rappresentativa dell'esposizione di un lavoratore alle vibrazioni meccaniche considerate; i metodi e le apparecchiature utilizzati devono essere adattati alle particolari caratteristiche delle vibrazioni meccaniche da misurare, ai fattori ambientali e alle caratteristiche dell'apparecchio di misurazione, conformemente alla norma UNI EN ISO 5349-2;

² Da qui in poi si farà sempre riferimento alla versione della norma attualmente in vigore.

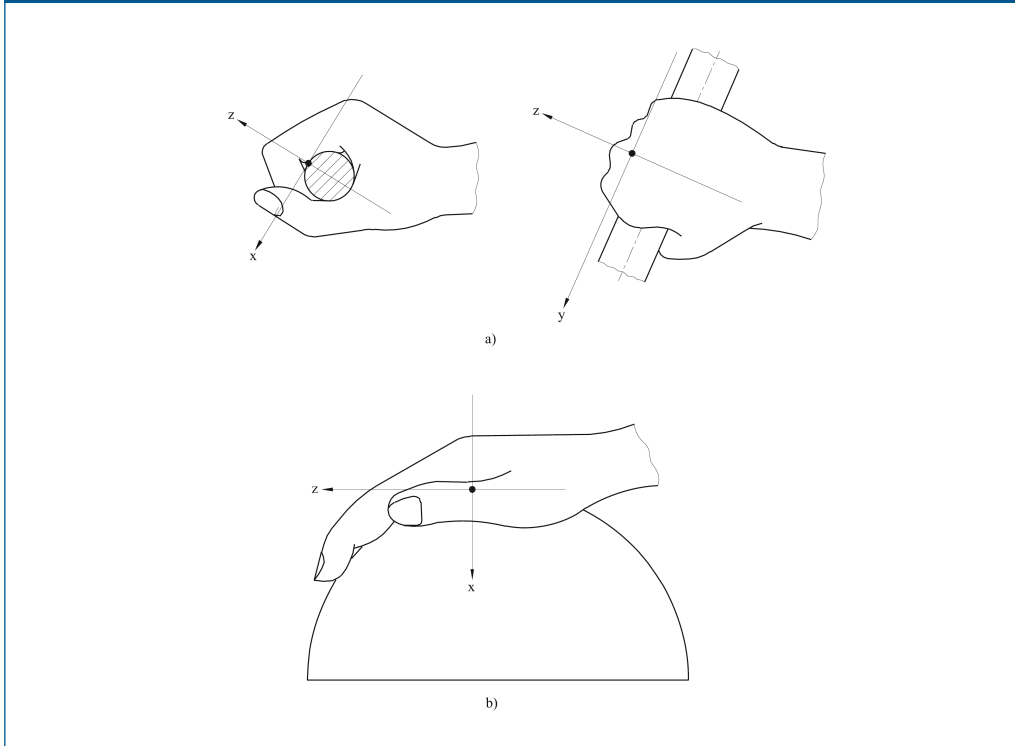
- b) la strumentazione deve essere conforme alle specifiche dettate dalla norma UNI EN ISO 8041-1:2017;
- c) nel caso di attrezzature che devono essere tenute con entrambe le mani, la misurazione è eseguita su ciascuna delle due mani. L'esposizione è determinata facendo riferimento al più alto dei due valori; deve essere inoltre fornita l'informazione relativa all'altra mano;
- d) gli accelerometri devono essere saldamente fissati sull'impugnatura dell'utensile, e la loro presenza non deve influenzare le modalità di prensione e lavorazione normalmente adottate dall'operatore;
- e) nei casi in cui la superficie vibrante a contatto con le mani sia il pezzo che viene lavorato piuttosto che l'utensile stesso, si deve montare l'accelerometro sulla superficie dell'elemento in lavorazione;
- f) i cavi degli accelerometri non devono essere sforzati, specialmente nelle immediate vicinanze del trasduttore, e non devono essere lasciati liberi di oscillare, per evitare artefatti nel segnale rilevato (rumore triboelettrico). È pertanto necessario fissare i cavi in prossimità del trasduttore mediante nastro adesivo;
- g) si raccomanda l'esecuzione del calcolo dell'incertezza da associare al descrittore dell'esposizione a vibrazioni, come dettagliato nell'Appendice F.

In ogni caso, preliminarmente alla misura è necessaria un'indagine finalizzata:

- allo studio del ciclo produttivo, delle mansioni, delle postazioni di misura e dei macchinari utilizzati nei vari reparti delle aree di lavoro;
- alla ricerca di informazioni sui tempi di permanenza dei lavoratori nelle singole postazioni di misura.

I rilievi vengono eseguiti relativamente ad un sistema di riferimento cartesiano definito come segue (Figura 5):

- asse x ortogonale al palmo della mano (rappresenta la vibrazione direzionale che attraversa la mano dal davanti al retro);
- asse z parallelo alle ossa dell'avambraccio (rappresenta la vibrazione direzionale che si verifica da sotto a sopra, parallelamente alle ossa del dorso della mano);
- asse y parallelo al palmo della mano ed ortogonale all'asse z (rappresenta la vibrazione direzionale che attraversa le nocche della mano da sinistra a destra).

Figura 5 Sistema di coordinate per la mano per il posizionamento dei trasduttori

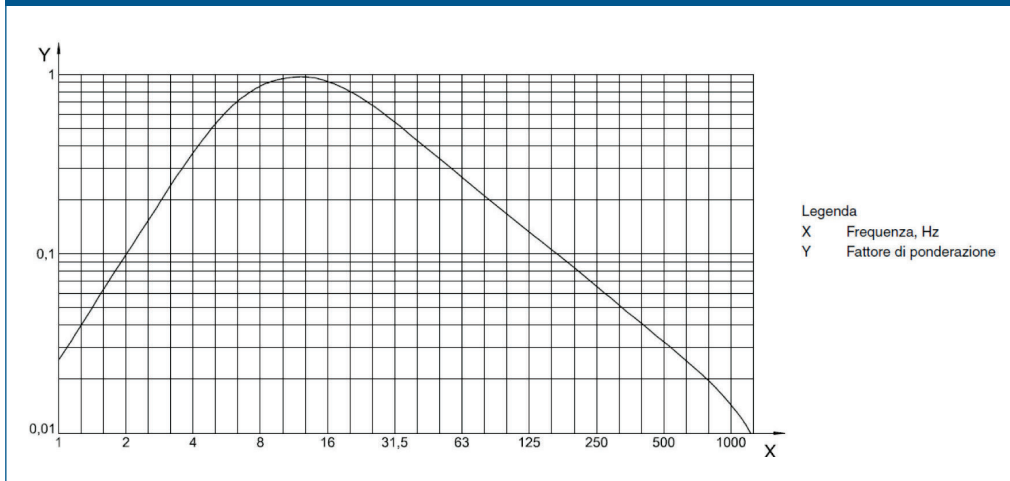
UNI EN ISO 5349-1:2004

Il metodo di calcolo definito dalle norme UNI EN ISO 5349 parti 1 e 2, si basa sulle misure delle tre accelerazioni assiali (ovvero ciascuna relativa ad un singolo asse x, y, z come sopra definiti e mostrati nella Figura 5) ponderate in frequenza a_{hwl} ($l = x, y, z$)

$$a_{hwl} = \sqrt{\left[\frac{1}{T} \int_0^T a_{hwl}^2(t) dt \right]} \quad \text{m/s}^2$$

a_{hwl} rappresenta il valore r.m.s. su un tempo T dell'accelerazione istantanea su un singolo asse l, ponderata in frequenza, ed è espressa in m/s^2 .

Figura 6

Curva di ponderazione W_h 

UNI EN ISO 5349-1:2004

La misurazione di a_{hwi} richiede l'applicazione della ponderazione in frequenza, che serve a tener conto della diversa sensibilità del corpo umano alle vibrazioni di frequenza diversa, analogamente a quanto viene fatto con la curva di ponderazione A in acustica per tener conto della sensibilità uditiva. In particolare, alle frequenze alle quali il sistema mano-braccio risulta maggiormente sensibile, viene assegnata una ponderazione più alta, mentre una ponderazione più bassa viene assegnata alle frequenze alle quali tale sistema risulta meno sensibile. La curva di ponderazione in frequenza utilizzata per le vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio è la curva W_h , definita dalla norma UNI EN ISO 5349-1. La Figura 6 mostra che la sensibilità massima si ha all'interno dell'intervallo di frequenza (8 - 16 Hz).

2.5.2 Posizionamento ed orientamento del sensore

Come si nota nella Figura 5, l'origine del sistema di riferimento si trova in corrispondenza della prima falange del dito medio. Si raccomanda pertanto, nei limiti del possibile, di collocare il sensore di accelerazione in corrispondenza di tale posizione.

Premesso che gli assi del sensore vanno orientati coerentemente con quanto illustrato nella Figura 5, poiché la curva di ponderazione in frequenza è la stessa per i tre assi, ed il descrittore della vibrazione coincide con il modulo del vettore accelerazione, l'esatto orientamento del sensore nello spazio è irrilevante.

Per misure eseguite su un singolo soggetto, si raccomanda di eseguire $N = 3$ misure. Questo da una parte consente di soddisfare quanto richiesto nella sezione 5.4.1 della UNI EN ISO 5349-2 (*almeno tre misure*) e dall'altra consente di calcolare in modo univoco il valore di esposizione su periodi brevi (vedi il punto 2.5.8), già definito nel quesito 3.01 dal Coordinamento tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro come il risultato della misura eseguita *nelle condizioni operative che determinano la massima esposizione reale nelle condizioni di lavoro*.

Nel caso si desideri ottenere un dato applicabile ad un gruppo di soggetti che eseguono la stessa operazione con lo stesso utensile (nel seguito definito gruppo omogeneo), si raccomanda che le misure siano eseguite su tre soggetti diversi, in aderenza con quanto richiesto al punto 7.3 della UNI EN ISO 5349-2. Ciò fra l'altro consente di stabilire un'analogia con quanto previsto per il rumore nella sezione 9.3 della norma UNI EN ISO 9612 (*Per tener conto delle reali variazioni nel livello di rumore, si raccomanda di misurare a tempi diversi durante il compito o su diversi lavoratori di un gruppo*).

Va tuttavia ricordato che nel caso delle vibrazioni molto più che nel caso del rumore, l'elemento individuale, relativo alle caratteristiche antropometriche e alla tecnica del singolo operatore, è un elemento potenzialmente in grado di determinare una forte variabilità nel risultato della misura. Pertanto, nel caso in cui lo stesso utensile/veicolo sia utilizzato da più soggetti, la misura va replicata su più soggetti oltre che più volte su ciascun soggetto. Al fine di mantenere l'univocità nella determinazione del valore di esposizione su periodi brevi, strettamente legata al numero di misure eseguite (vedi il successivo punto 2.5.8), si raccomanda di eseguire tre misure per ogni soggetto su un numero di soggetti pari ad almeno 1/3 della consistenza del gruppo omogeneo, arrotondato per eccesso (ovvero 2 soggetti per gruppi fino a 6, 3 soggetti per gruppi fino a 9 e così via).

2.5.4 Durata delle misure

L'indicazione fornita nella sezione 5.4.1 della UNI EN ISO 5349-2 è che la durata complessiva della misura, ovvero la somma delle durate individuali delle singole misure, sia non inferiore ad 1 minuto. In considerazione del vincolo all'esecuzione di $N = 3$ misure formulato al punto precedente, si raccomanda che la durata individuale di ciascuna misura sia non inferiore a 20 secondi, e per quanto possibile la stessa in tutte le misure eseguite nelle stesse condizioni.

La durata raccomandata di 20 secondi è, come ragionevole attendersi, marginalmente superiore alla durata (12 secondi) raccomandata dalla UNI EN 1032 nell'esecuzione di misure mirate alla dichiarazione della vibrazione secondo la direttiva macchine, che sono riferite a condizione operative più stabili.

2.5.5 Calcolo dell'accelerazione ponderata

Ciascuna accelerazione ponderata assiale a_{hwi} (a_{hwx} , a_{hwy} , a_{hwz}) relativa ad una singola operazione viene calcolata come media quadratica dei valori a_{hwli} ottenuti nelle $N = 3$ misure eseguite, pesati dai rispettivi tempi di misura T_i , in aderenza a quanto indicato nella sezione 5.4.1 della norma UNI EN ISO 5349-2. Pertanto:

$$a_{hwi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 a_{hwli}^2 \times T_i}{\sum_{i=1}^3 T_i}}$$

Questa equazione assicura l'equivalenza fra il risultato di una singola misura di lunga durata e il risultato che si ottiene frammentando tale misura in un numero arbitrario di misure (in questo caso tre) di durata individuale arbitraria.

2.5.6 Il descrittore della vibrazione

Nella maggior parte degli utensili, la vibrazione che interessa la mano contiene contributi da tutte e tre le direzioni di misurazione. La valutazione dell'esposizione alla vibrazione va pertanto eseguita mediante una grandezza che combina i risultati ottenuti lungo tutti e tre gli assi. Per semplicità la normativa tecnica assume che i contributi lungo le tre direzioni assiali siano ugualmente importanti. Si utilizza pertanto come descrittore il valore totale della vibrazione a_{hv} , definito come la somma quadratica delle tre accelerazioni assiali.

Il valore medio del valore totale della vibrazione a_{hv} , si ottiene sommando quadraticamente, mediante l'equazione (1) della UNI EN ISO 5349-1, i valori medi delle tre componenti assiali, ottenuti al punto 2.5.5.

$$a_{hv} = \sqrt{a_{hwx}^2 + a_{hwy}^2 + a_{hwz}^2}$$

Il percorso alternativo che prevede prima il calcolo del valore totale di vibrazione per ogni misura e poi la media quadratica dei diversi valori totali di vibrazione, pesati dai rispettivi tempi di misura, fornisce lo stesso risultato.

In coerenza con quanto detto sopra, viene utilizzata per tutte e tre le accelerazioni assiali la stessa curva di ponderazione W_h (Figura 6).

2.5.7 Esposizione giornaliera

Ai fini del calcolo dell'esposizione giornaliera a vibrazioni, si assume (principio di equal energia) che due esposizioni quotidiane, caratterizzate da valori totali di vibrazioni a_{hv1} e a_{hv2} e durate T_1 e T_2 , siano equivalenti dal punto di vista dei potenziali rischi alla salute se vale la seguente condizione:

$$a_{hv1} \sqrt{T_1} = a_{hv2} \sqrt{T_2}$$

Sulla base del citato principio, l'esposizione a vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio viene quantificata mediante il 'valore totale di vibrazione ponderato in frequenza per un periodo di riferimento di 8 ore' indicato con il simbolo $A(8)$ e comunemente detto esposizione giornaliera a vibrazioni.

Nel caso in cui durante la giornata lavorativa venga eseguita soltanto un'operazione che comporta una esposizione a vibrazioni significativa, la quantità $A(8)$ viene calcolata con l'espressione:

$$A(8) = a_{hv} \sqrt{\frac{T_e}{8}} \quad \text{m/s}^2$$

dove:

- a_{hv} è il valore totale di vibrazione definito al precedente punto 2.5.6;
- T_e è la durata complessiva giornaliera dell'esposizione a vibrazioni (in ore).

Nel caso (assai più comune) in cui invece il lavoratore sia esposto a differenti sorgenti di vibrazioni, come nel caso di impiego di più utensili vibranti nell'arco della giornata lavorativa, o nel caso dell'impiego di uno stesso macchinario in differenti condizioni operative, la quantità $A(8)$ viene calcolata con l'espressione:

$$A(8) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M a_{hvj}^2 T_j}{8}} \quad \text{m/s}^2$$

ovvero

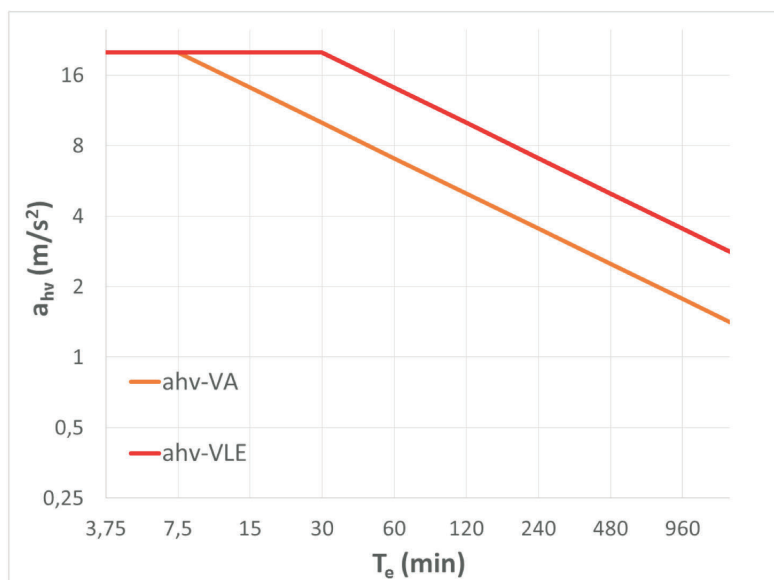
$$A(8) = \sqrt{\sum_{j=1}^M A(8)_j^2} \quad \text{m/s}^2$$

dove:

- a_{hvj} è il valore totale di vibrazione relativo all'attività j-esima;
- T_j è il tempo di esposizione alle vibrazioni relativo all'attività j-esima (in ore);
- M è il numero totale delle attività che implicano esposizione a vibrazioni;
- $A(8)_j$ è l'esposizione parziale dovuta alla sola attività j-esima, scalata alle 8 ore della giornata lavorativa nominale.

Figura 7

Valori soglia di legge per esposizioni HAV



(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

Per quanto riguarda la stima del tempo di esposizione a vibrazioni relativo all'attività j-esima T_j , si può procedere sulla falsariga di quanto indicato nella sezione A.2.3.1 della norma DIN 45660-2, e nella sezione C.2.3 della norma UNI EN ISO 9612 sull'esposizione professionale a rumore. Tale stima viene ottenuta mediando aritmeticamente almeno due diverse stime indipendenti ottenute anche con metodi e/o da fonti diverse o, al limite, dagli estremi di un intervallo di variabilità dichiarato.

Infine va sottolineato come il metodo di calcolo di A(8) sopra descritto si applichi sia alla stima di accelerazione ottenuta mediante misure, sia alle stime ottenute facendo ricorso a BDV o a informazioni fornite dal fabbricante (vedi sezione 2.4).

La Figura 7 mostra i due valori soglia indicati nell'art. 201 del d.lgs. 81/2008, rappresentati nel piano $\log(a_{hv})$ - $\log(T_e)$, nel quale essi assumono la forma di due rette. Per $T_e = 8$ ore (480 minuti) la retta inferiore (a_{hv} -VA, di colore arancione), associata al valore di azione, vale $2,5 \text{ m/s}^2$, mentre la retta superiore (a_{hv} -VLE, di colore rosso), associata al valore limite di esposizione, vale 5 m/s^2 .

In coerenza con la presenza nel d.lgs. 81/2008 di un valore limite di esposizione per periodi brevi pari a 20 m/s^2 , le due rette esistono soltanto per tempi tali da determinare valori di accelerazione inferiori a tale limite.

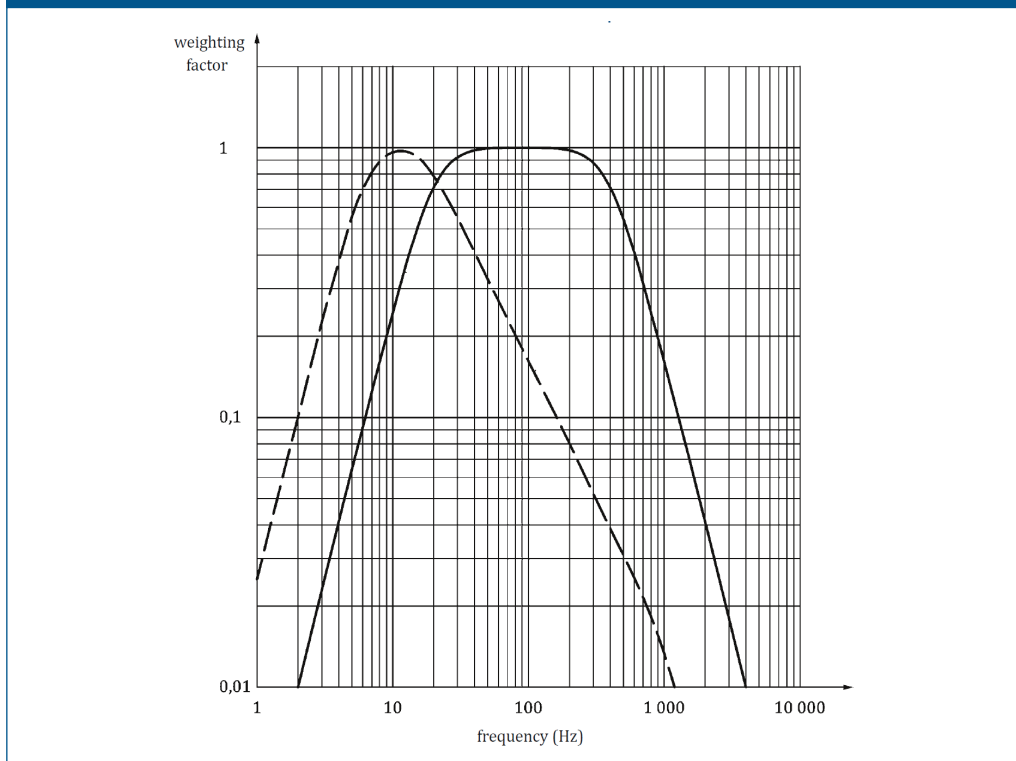
Nell'Appendice H vengono riportati alcuni esempi applicativi dei concetti espressi in questa sezione 2.5.

L'esposizione su periodi brevi va stimata in corrispondenza alle condizioni operative reali di massima esposizione. L'esposizione su periodi brevi per una qualsiasi attività viene quindi quantificata mediante il più alto dei valori misurati di a_{hv} . Il valore di questa quantità da utilizzare nel contesto della valutazione del rischio è il più alto dei valori ottenuti per le diverse attività che compongono la giornata lavorativa. Nel caso di gruppi omogenei, ad ogni lavoratore si attribuisce il più alto dei valori misurati sui soggetti campionati.

2.5.9 Metodo supplementare di misura per il rischio vascolare

Numerosi studi scientifici hanno dimostrato come l'applicazione del metodo proposto dalla UNI EN ISO 5349-1 per la valutazione del rischio associato alle HAV non sia il criterio migliore per prevedere gli effetti di tipo vascolare, come il fenomeno di Reynaud (o 'dito bianco da vibrazioni').

Figura 8 Andamento in frequenza delle curve di ponderazione W_b (linea continua) e W_h (linea tratteggiata).



La motivazione di ciò va ricercata principalmente nel fatto che i valori della curva di ponderazione frequenziale (W_h) proposta dalla suddetta norma derivano da un unico studio sperimentale psicofisico, molto datato e che ha coinvolto un numero limitato di partecipanti. I risultati di tale studio sono stati poi applicati per prevedere tutti gli effetti avversi (nervosi, muscolari e osteo-articolari, oltre che vascolari) delle HAV, ma senza alcuna discriminazione tra gli stessi. A seconda dei diversi casi, quindi, questo può portare ad una sovrastima o, peggio, ad una sottostima degli effetti vascolari da esposizione alle HAV. A tal riguardo il rapporto tecnico UNI ISO/TR 18570:2018 ha introdotto, per la valutazione dei soli effetti vascolari dovuti alle HAV, un metodo supplementare che integra quello proposto dalla norma UNI EN ISO 5349-1, descritto ampiamente nei punti precedenti. Tale metodo si basa su una nuova curva di ponderazione (denominata W_p) i cui valori derivano dai risultati ottenuti in diversi recenti studi.

Nella Figura 8 è mostrata la curva di ponderazione W_p , a confronto con la curva W_h introdotta in precedenza e mostrata nella Figura 6. Si noti come, a differenza della curva W_h che pesa maggiormente le frequenze comprese tra 6 e 25 Hz, la curva W_p introdotta dal rapporto tecnico UNI ISO/TR 18570 enfatizza di più le frequenze comprese tra 20 e 400 Hz. Nel suddetto rapporto tecnico UNI ISO/TR 18570 viene inoltre introdotto il concetto di 'esposizione giornaliera a vibrazioni $E_{p,d}$ ' il cui valore sembra essere correlato all'insorgenza del fenomeno di Raynaud. Per una singola lavorazione, $E_{p,d}$ si ottiene con la seguente equazione:

$$E_{p,d} = a_{pv} \sqrt{T} \quad (\text{m/s}^{1.5})$$

con

$$a_{pv} = \sqrt{a_{px}^2 + a_{py}^2 + a_{pz}^2} \quad (\text{m/s}^2)$$

dove a_{px} , a_{py} e a_{pz} rappresentano le tre componenti assiali delle accelerazioni ponderate secondo la curva W_p , e T la durata (in secondi) della singola lavorazione.

Nel rapporto tecnico si indica un'insorgenza ed il successivo sviluppo di dito bianco da vibrazioni per valori di $E_{p,d}$ compresi tra 1150 e 1750 $\text{m/s}^{1.5}$. La Tabella 7 confronta per alcuni utensili vibranti, riprendendo i dati riportati nella Tabella C.1 del rapporto tecnico UNI ISO/TR 18570, i tempi di esposizione (T_{\max}) dopo i quali vengono raggiunti rispettivamente il valore d'azione A(8) di cui al d.lgs. 81/2008 (pari a 2,5 m/s^2) ed il valore minimo di $E_{p,d}$ di cui al rapporto tecnico (pari a 1150 $\text{m/s}^{1.5}$). Si nota che i tempi calcolati con la nuova metodica sono assai più contenuti, per fattori che raggiungono anche di un ordine di grandezza.

In conclusione, alla luce della possibile forte sottostima del rischio vascolare che questo confronto lascia intendere, si raccomanda di affiancare sempre alla metodica di valutazione del rischio obbligatoria per legge, illustrata nella UNI EN ISO 5349-1, la

metodica proposta dal rapporto tecnico UNI ISO/TR 18570 che rappresenta un valido strumento per migliorare la gestione della prevenzione dei disturbi vascolari e determinare le opportune misure correttive (ad esempio ricorrendo all'utilizzo dei guanti antivibranti, generalmente molto e) caci a frequenze medio-alte).

Tabella 7 Confronto tra i valori totali di vibrazione ed i tempi massimi di esposizione consentiti, secondo le metodiche illustrate nella UNI EN ISO 5349-1 e nel rapporto tecnico UNI ISO/TR 18570

Utensile	UNI EN ISO 5349-1		UNI ISO/TR 18570	
	a_{hv} (m/s ²)	T_{max} (minuti)	a_{hv} (m/s ²)	T_{max} (minuti)
Martello demolitore	15	13	74	4
Smerigliatrice angolare	6	83	58	7
Sparachiodi	7	61	41	13
Motosega	3	333	21	50

2.6 MISURA DELL'ESPOSIZIONE AL CORPO INTERO

Esistono sostanzialmente tre metodi per ottenere una stima, derivata da misure, della vibrazione che consenta il calcolo dell'esposizione alle WBV:

1. Il metodo r.m.s., descritto nella norma UNI ISO 2631-1:2014, che è il metodo base ed è l'unico esplicitamente previsto dal d.lgs. 81/2008 per il calcolo del descrittore di esposizione $A(8)$;
2. Il metodo alla quarta potenza della dose giornaliera di vibrazioni (VDV), anch'esso descritto nella norma UNI ISO 2631-1:2014 e presente nella direttiva 2002/44/CE, il cui risultato è utilizzabile come descrittore aggiuntivo in presenza di fenomeni impulsivi;
3. Il metodo della dose equivalente di compressione statica giornaliera, S_{ed} , descritto nello standard ISO 2631-5:2018, che è possibile utilizzare in presenza di esposizioni ad urti ripetuti, situazioni nelle quali sia il metodo r.m.s. che il metodo VDV risultano inadeguati a prevedere il rischio di danni lombari.

Come è ovvio comprendere, tutti i sopra citati metodi prevedono la (corretta) acquisizione di dati accelerometrici i cui aspetti sono trattati nel seguente punto 2.6.1.

2.6.1 La misura dell'accelerazione

Ai sensi del d.lgs. 81/2008, appendice XXXV parte B, la misura dell'accelerazione associata alle vibrazioni trasmesse al corpo intero (WBV) ed il calcolo dei descrittori di esposizione, deve essere effettuata in accordo con quanto prescritto dallo standard ISO 2631-1:1997 (aggiornato e recepito in Italia attualmente dalla norma UNI ISO 2631-1:2014)³.

³ Da qui in poi si farà sempre riferimento alla versione attualmente in vigore.

Qualora si decida di procedere alla misurazione, è importante tener conto dei seguenti aspetti:

- a) i protocolli utilizzati possono includere la campionatura, purché essa sia rappresentativa dell'esposizione di un lavoratore alle vibrazioni meccaniche considerate. La metodologia utilizzata deve pertanto essere adeguata alle particolari caratteristiche delle vibrazioni meccaniche da misurare, ai fattori ambientali ed alle caratteristiche dell'apparecchio di misurazione;
- b) la strumentazione deve essere conforme alle specifiche dettate dalla norma UNI EN ISO 8041-1:2017;
- c) le misure vanno effettuate sulla superficie di contatto tra il corpo e la sorgente di vibrazioni;
- d) l'accelerometro triassiale va fissato tramite nastro adesivo sul sedile del mezzo di guida. I cavi degli accelerometri non devono essere sforzati, specialmente nelle immediate vicinanze del trasduttore, e non devono essere lasciati liberi di oscillare, per evitare artefatti nel segnale rilevato (rumore triboelettrico). È pertanto necessario fissare i cavi in prossimità del trasduttore mediante nastro adesivo;
- e) si raccomanda l'esecuzione del calcolo dell'incertezza da associare al descrittore dell'esposizione a vibrazioni, come dettagliato nell'Appendice F.

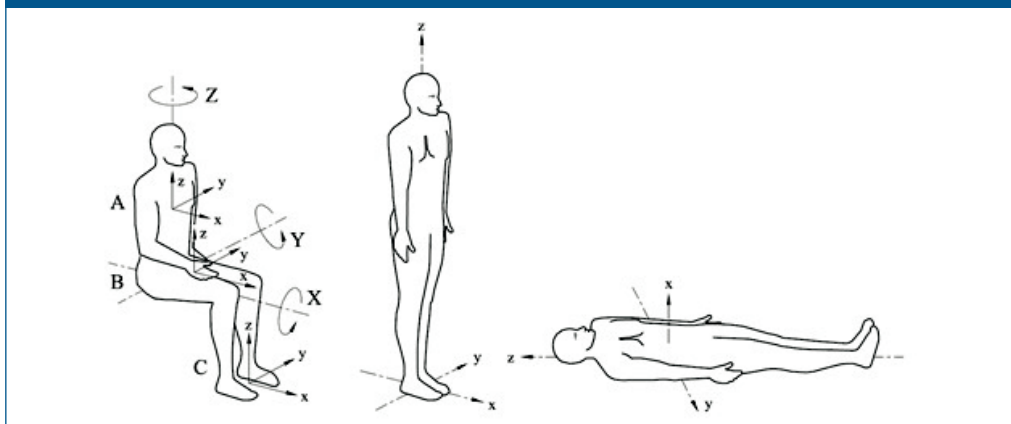
Si segnala infine che la norma UNI 11568:2015 'Strumenti e analisi per la misura delle vibrazioni' fornisce indicazioni di carattere generale al fine di specificare gli aspetti metrologici, metodologici e strumentali per la misurazione e l'analisi delle vibrazioni.

In ogni caso, preliminarmente alla misura, è necessaria un'indagine finalizzata:

- allo studio del ciclo produttivo, delle mansioni, delle postazioni di misura e dei macchinari utilizzati nei vari reparti delle aree di lavoro;
- alla ricerca di informazioni sui tempi di permanenza nelle singole postazioni di misura.

Figura 9

Sistema di assi basicentrico definito dalla UNI ISO 2631-1



UNI ISO 2631-1:2014

I rilievi vengono eseguiti relativamente ad un sistema di riferimento cartesiano, detto basicoentrico, definito come segue (UNI ISO 2631-1), e mostrato nella Figura 9:

- l'asse z deve essere parallelo alla spina dorsale (rappresenta la vibrazione direzionale che passa parallelamente alla spina dorsale dalle natiche alla testa);
- l'asse y deve essere perpendicolare all'asse femorale (rappresenta la vibrazione direzionale che passa attraverso il petto, da destra a sinistra);
- l'asse x deve essere ortogonale ai precedenti (rappresenta la vibrazione direzionale che passa dalla schiena al petto).

Il metodo di calcolo definito dalla norma UNI ISO 2631-1 si basa sulla misura delle tre accelerazioni assiali ponderate in frequenza:

$$a_{wi} = \sqrt{\left[\frac{1}{T} \int_0^T a_{wi}^2(t) dt \right]} \quad \text{m/s}^2$$

che rappresentano ciascuna il valore r.m.s. su un tempo T dell'accelerazione istantanea su un singolo asse I.

L'intervallo di frequenze di interesse igienistico si estende da 0,1 Hz a 80 Hz; in particolare:

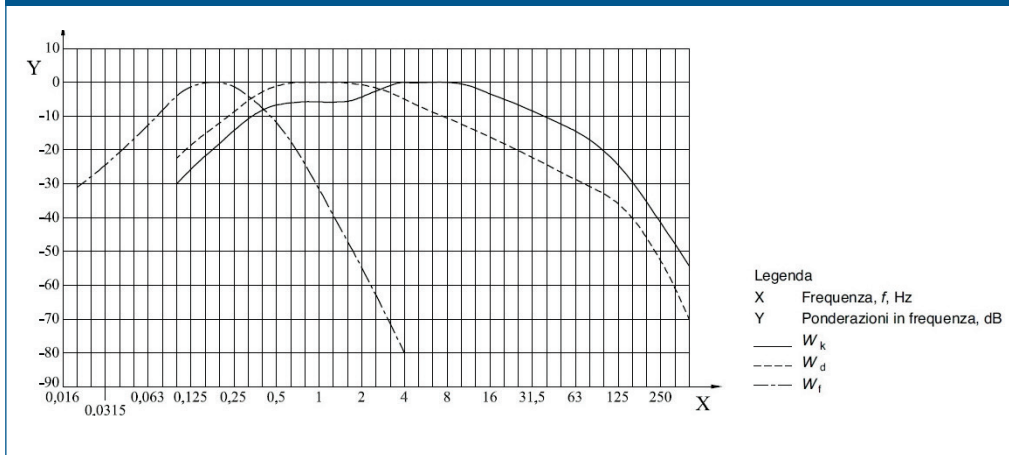
- da 0,5 Hz a 80 Hz per gli effetti sulla salute, sul benessere e sulla percezione;
- da 0,1 Hz a 0,5 Hz per il cosiddetto mal di moto (o dei trasporti).

La misurazione di a_{wi} richiede l'applicazione della ponderazione in frequenza, che serve a tener conto della diversa sensibilità del corpo umano alle vibrazioni di frequenza diversa, analogamente a quanto viene fatto con la curva di ponderazione A in acustica per tener conto della sensibilità uditiva. In particolare alle frequenze alle quali il corpo umano risulta maggiormente sensibile viene assegnata una ponderazione più alta, mentre una ponderazione più bassa viene assegnata alle frequenze alle quali esso risulta meno sensibile.

La norma UNI ISO 2631-1 definisce diverse curve di ponderazione per i diversi assi di misura x, y, z, e per le differenti posture del corpo esposto a vibrazioni: eretta, seduta, supina. Nella Figura 10 sono riportate le curve di ponderazione principali. La curva di ponderazione relativa a sollecitazioni verticali (W_k) possiede un massimo nell'intervallo 4 - 8 Hz, mentre la curva di ponderazione relativa a sollecitazioni nel piano orizzontale (W_d) possiede un massimo nell'intervallo 1 - 2 Hz.

Figura 10

Principali curve di ponderazione in frequenza (UNI ISO 2631-1)



UNI ISO 2631-1:2014

Infine la curva di ponderazione relativa al mal di moto (W_f) mostra un massimo intorno a 0,2 Hz. Fermo restando che quest'ultimo può comunque avere effetti (di tipo indiretto) sulla sicurezza, e che quindi va sempre preso in considerazione in una corretta valutazione del rischio, esso non implica effetti diretti sulla salute del soggetto esposto. Per una trattazione esaustiva del mal di moto si rimanda all'appendice D.

2.6.2 Posizionamento ed orientamento del sensore

Come indicazione generale, le vibrazioni vanno misurate quanto più vicino possibile al punto di ingresso nel corpo. In particolare, nel caso di soggetti seduti, il trasduttore deve essere collocato a metà strada fra le due tuberosità ischiatiche, ovvero sulla perpendicolare della colonna vertebrale. Nel caso di soggetti che operano in posizione eretta il trasduttore va collocato fra i due piedi (UNI EN 1032, punto 6.2).

Al contrario di quanto avviene per le HAV, per le WBV la curva di ponderazione in frequenza relativa all'asse z è diversa dalla curva di ponderazione in frequenza relativa agli assi x e y . Inoltre il descrittore della vibrazione non coincide con il modulo del vettore accelerazione. Pertanto è importante che il sensore venga orientato coerentemente con il sistema di riferimento mostrato nella Figura 9. La norma UNI EN 1032 ammette deviazioni fino a $\pm 15^\circ$ rispetto agli assi del sistema di riferimento mostrato nella Figura 9.

La norma UNI ISO 2631-1 non fornisce alcuna indicazione riguardo al numero di misurazioni da eseguire. In assenza di indicazioni contrarie, si assume che le considerazioni fatte per le HAV valgano anche per le WBV.

2.6.4 Durata delle misure

La norma UNI ISO 2631-1 non fornisce indicazioni precise riguardo alla durata della misura. L'unica indicazione quantitativa riguarda la durata necessaria ad ottenere un'incertezza non superiore a 3 dB su tutto l'intervallo di frequenze d'interesse per segnali casuali stazionari (punto 5.5 della suddetta norma), la quale dipende dalla minima frequenza significativa. Assumendo che la minima frequenza significativa sia di 0,5 Hz, la durata minima indicata dalla UNI ISO 2631-1 è di 227 secondi. Benché la stessa UNI ISO 2631-1 sostenga che la durata della misura sia generalmente molto più lunga di tale valore minimo, è possibile che ciò sia dovuto all'assunzione che venga eseguita una sola misura. Si ritiene che tale valore sia adeguato all'esecuzione di una misura individuale, e arrotondando si raccomanda pertanto una durata minima per ciascuna misura pari a 240 secondi. Tale valore risulta infatti coerente con la durata minima di 20 secondi suggerita per le HAV tenuto conto che le relative frequenze minime significative sono in un rapporto vicino ad 1:12 (0,5 Hz per le WBV - UNI ISO 2631-1 sezione 1, 6,3 Hz per le HAV - UNI EN ISO 5349-1, sezione A.2).

La durata raccomandata di 240 secondi è, come ragionevole attendersi, marginalmente superiore alla durata (180 secondi) raccomandata dalla UNI EN 1032 nell'esecuzione di misure mirate alla dichiarazione della vibrazione secondo la direttiva macchine, che sono riferite a condizione operative più stabili.

2.6.5 Calcolo dell'accelerazione ponderata

La norma UNI ISO 2631-1 non fornisce alcuna indicazione riguardo al procedimento da seguire per combinare le diverse misure eseguite. In assenza di indicazioni contrarie, si assume che le considerazioni fatte per le HAV valgano anche per le WBV. Pertanto ciascuna accelerazione ponderata assiale a_{wx} , a_{wy} , a_{wz} relativa ad una singola operazione viene calcolata come la media quadratica dei risultati delle N eseguite a_{wli} , pesati dai rispettivi tempi di misura T_i . Per quanto detto al precedente punto 2.6.3 si raccomanda l'esecuzione di $N = 3$ misure, e dunque:

$$a_{wl} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 a_{wli}^2 \times T_i}{\sum_{i=1}^3 T_i}}$$

dove $l = x, y, z$. Questa equazione assicura l'equivalenza fra il risultato di una singola misura di lunga durata e il risultato che si ottiene frammentando tale misura in un numero arbitrario di misure (in questo caso tre) di durata arbitraria.

2.6.6 Calcolo del valore totale della vibrazione

Il valore medio del valore totale della vibrazione a_v viene calcolato tenendo conto della presenza dei pesi assiali k_i :

$$a_v = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2}$$

come mostra l'equazione (10) della UNI ISO 2631-1. I valori dei fattori peso assiali $k_x = 1,4$; $k_y = 1,4$; $k_z = 1$ sono stati determinati con specifico riferimento a soggetti in posizione seduta. In considerazione dell'attuale assenza di studi di dettaglio, tali valori sono assunti validi anche per soggetti che operano in posizione eretta.

2.6.7 Esposizione giornaliera

L'esposizione giornaliera alle vibrazioni A(8) è il descrittore da utilizzare ai fini della valutazione del rischio (d.lgs. 81/2008, Allegato XXXV punto B). Come nel caso delle vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio, ai fini del calcolo del descrittore A(8) dell'esposizione a vibrazioni trasmesse al corpo intero si assume (principio di egual energia) che due esposizioni quotidiane, di entità a_{w1} e a_{w2} e durata T_1 e T_2 , sono equivalenti dal punto di vista del punto di vista dei potenziali rischi per la salute se vale la seguente condizione:

$$a_{w1} \sqrt{T_1} = a_{w2} \sqrt{T_2}$$

Sulla base del citato principio, nel caso in cui durante la giornata lavorativa venga eseguita soltanto un'operazione che comporta una esposizione a vibrazioni significativa, l'esposizione giornaliera a vibrazioni trasmesse al corpo intero viene calcolata mediante la formula:

$$A_l(8) = k_l \sqrt{\frac{a_{wl}^2 T_e}{T_0}} \quad \text{m/s}^2$$

nella quale:

- l indica genericamente uno dei tre assi x, y, z ;
- k_l è il fattore peso assiale ($k_x = 1,4$; $k_y = 1,4$; $k_z = 1$);
- a_{wl} è l'accelerazione ponderata relativa al generico asse l ;
- T_e è il tempo totale di esposizione (in ore);
- $T_0 = 8$ ore è la durata nominale della giornata lavorativa.

Come appare nella formula e come peraltro indicato esplicitamente nella UNI ISO 2631-1, l'esposizione giornaliera deve essere calcolata indipendentemente per ciascuno dei tre assi x, y e z .

In parallelo all'esposizione assiale si calcola anche l'esposizione giornaliera triassiale a vibrazioni $A_v(8)$

$$A_v(8) = \sqrt{\frac{a_v^2 T_e}{T_0}} \quad \text{m/s}^2$$

Nel caso in cui nell'arco della giornata lavorativa il lavoratore sia esposto a più fonti di vibrazioni, come nel caso di impiego di più mezzi meccanici, l'esposizione giornaliera assiale a vibrazioni $A_l(8)$, viene calcolata mediante l'espressione:

$$A_l(8) = k_l \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M a_{wlj}^2 T_j}{T_0}} \quad \text{m/s}^2$$

dove:

- a_{wlj} è l'accelerazione ponderata relativa al generico asse l nel corso dell'attività j-esima;
- T_j è il tempo di esposizione all'attività j-esima (in ore);

ovvero

$$A_l(8) = \sqrt{\sum_{j=1}^M A(8)_{lj}^2} \quad \text{m/s}^2$$

dove $A_{lj}(8)$ è l'esposizione giornaliera lungo il generico asse l, relativa alla sola attività j-esima (delle M totali), ovvero:

$$A_{lj}(8) = a_{wlj} \sqrt{\frac{T_j}{8}} \quad \text{m/s}^2$$

In parallelo all'esposizione assiale si calcola anche l'esposizione giornaliera triassiale a vibrazioni $A_v(8)$

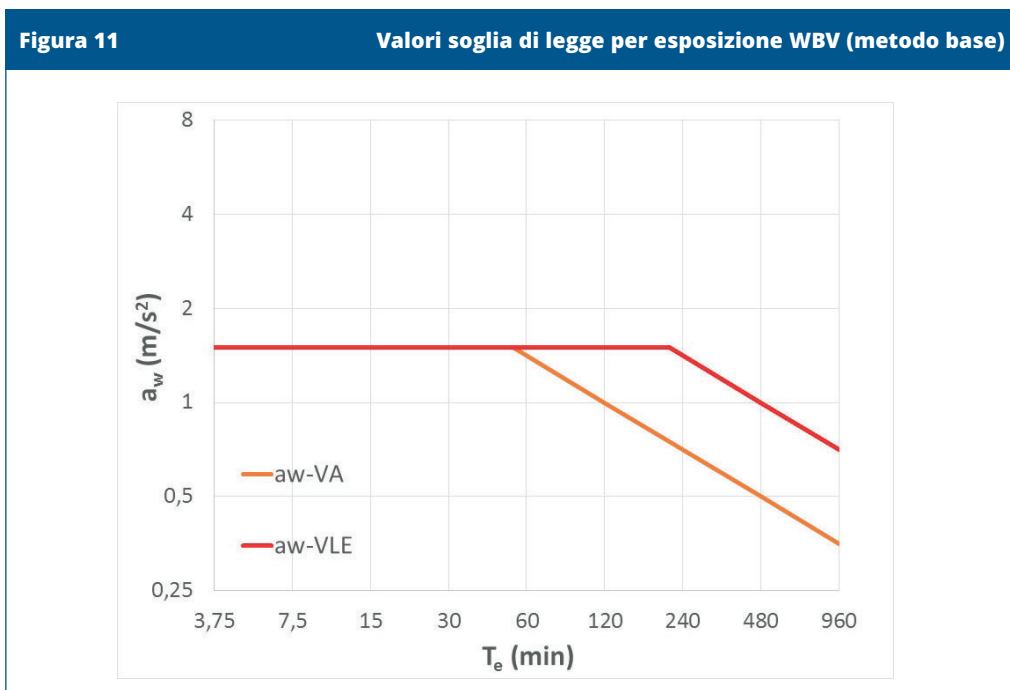
$$A_v(8) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M a_{vj}^2 T_j}{T_0}} \quad \text{m/s}^2$$

dove a_{vj} è il valore totale della vibrazione relativo alla j-esima attività.

In analogia con quanto già discusso nella precedente sezione 2.5 sulla esposizione alle HAV, per quanto riguarda la stima del tempo di esposizione T_j ad una data specifica

attività, si può procedere sulla falsariga di quanto indicato nella sezione C.2.3 della norma UNI EN ISO 9612 sull'esposizione professionale a rumore. Tale stima viene calcolata mediando aritmeticamente almeno due diverse stime indipendenti ottenute anche con metodi e/o da fonti diverse o al limite dagli estremi di un intervallo di variabilità dichiarato.

Infine, di nuovo in analogia con quanto già discusso nella precedente sezione 2.5 sulla esposizione alle HAV, va sottolineato come il metodo di calcolo di A(8) sopra descritto si applichi sia a stime di accelerazioni ottenute da misure, sia a stime di accelerazioni ottenute facendo ricorso a BDV o a informazioni fornite dal fabbricante (vedi sezione 2.4).



(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

La Figura 11 mostra i due valori soglia indicati nell'art. 201 del d.lgs. 81/2008, rappresentati nel piano $\log(a_w) - \log(T_e)$, nel quale essi assumono la forma di due rette. Per $T_e = 8$ ore (480 minuti) la retta inferiore (a_w -VA, colore arancione), associata al valore di azione, vale $0,5 m/s^2$, mentre la retta superiore (a_w -VLE, colore rosso), associata al valore limite di esposizione, vale $1 m/s^2$. In coerenza con la presenza nel d.lgs. 81/2008 di un valore limite di esposizione per periodi brevi pari a $1,5 m/s^2$, le due rette esistono soltanto per tempi tali da determinare valori di accelerazione inferiori a tale limite.

Nella Figura 11 si nota che le rette oblique (corrispondenti ad $A(8) = 0,5 \text{ m/s}^2$ e $A(8) = 1 \text{ m/s}^2$) esistono soltanto per tempi relativamente lunghi (rispettivamente maggiori di 53 e 213 minuti) a causa del fatto che il valore limite di esposizione per periodi brevi è molto prossimo ai valori soglia di $A(8)$. Per esposizioni alle HAV al contrario, poiché il valore limite per periodi brevi è molto più alto dei valori soglia di $A(8)$, le rette associate ai valori soglia di $A(8)$ esistono anche per tempi relativamente corti.

2.6.8 Il descrittore della vibrazione

Il punto 1 della parte B dell'Allegato XXXV del d.lgs. 81/2008 prevede che il descrittore della esposizione giornaliera a vibrazioni sia calcolato *come il più alto dei valori quadratici medi delle accelerazioni ponderate in frequenza, determinati sui tre assi ortogonali*, aggiungendo poi che ciò deve avvenire *conformemente allo standard ISO 2631-1 (1997) che viene qui adottata in toto*. In tema di descrittori della vibrazione, la norma UNI ISO 2631-1 stabilisce al punto 7.2.4 quanto segue: *La valutazione dell'effetto di una vibrazione sulla salute deve essere effettuata in modo indipendente lungo ciascun asse. La valutazione delle vibrazioni deve essere effettuata in relazione alla massima accelerazione ponderata in frequenza determinata su qualsiasi asse del sedile*. Ad integrazione di questa affermazione, la successiva nota indica che *Quando le vibrazioni su due o più assi sono confrontabili, talvolta si utilizza il valore totale delle vibrazioni come stima addizionale del rischio per la salute*. Niente viene detto tuttavia riguardo alle circostanze nelle quali abbia senso utilizzare questa stima addizionale. Poco aggiunge la nota 2 al punto 6.5: *Il valore vibratorio totale o la somma vettoriale sono stati proposti per la valutazione relativa a salute e sicurezza se non esiste un asse o una vibrazione dominante*.

Il combinato disposto del d.lgs. 81/2008 e della normativa tecnica sembra pertanto essere mirato all'adozione di un sistema misto nel quale il descrittore è di tipo triassiale in assenza di un asse dominante, mentre è di tipo monoassiale in presenza di un asse dominante. Sulla base di queste indicazioni qualitative, viene qui proposto il seguente criterio operativo quantitativo:

- 1) si calcolano i tre valori assiali dell'esposizione giornaliera a vibrazioni $A_x(8)$, $A_y(8)$, $A_z(8)$ secondo quanto illustrato al punto 2.6.7;
- 2) si calcola l'esposizione giornaliera triassiale a vibrazioni $A_v(8)$ secondo quanto illustrato al punto 2.6.7;
- 3) se per uno dei tre assi risulta soddisfatta la disequaglianza;

$$A_i(8) > 0,8 A_v(8)$$

siamo in presenza di un asse dominante. In questo caso la quantità $A(8)$ che soddisfa la disequaglianza è il descrittore della vibrazione utilizzabile ai sensi del d.lgs. 81/2008.

Questa condizione è approssimativamente equivalente alla condizione richiesta al punto 6.4 della UNI EN 1032, ovvero che ciascuno dei due contributi secondari (comprensivi degli opportuni fattori peso assiali) non sia superiore al 66% del contributo dell'asse dominante (anch'esso comprensivo dell'opportuno fattore peso

assiale). Va notato tuttavia che il criterio formulato nella UNI EN 1032 è finalizzato non a poter (eventualmente) trascurare gli assi secondari nel calcolo del descrittore, quanto a poter (eventualmente) procedere alla misura del solo asse dominante;

- 4) se, al contrario, la diseguaglianza non viene soddisfatta, non esiste un asse dominante, ed il descrittore della vibrazione utilizzabile ai sensi del d.lgs. 81/2008 è l'esposizione giornaliera triassiale alle vibrazioni A(8), determinata a partire dai valori totali di vibrazione relativi alle diverse attività.

2.6.9 Periodi brevi

L'esposizione su periodi brevi va stimata in corrispondenza alle condizioni operative reali di massima esposizione. L'esposizione su periodi brevi per una qualsiasi attività va dunque quantificata mediante il più alto dei valori misurati per l'opportuno descrittore della vibrazione. Sulla base del principio di precauzione, viene prescelto come descrittore della vibrazione il valore totale di vibrazione a_v . Di conseguenza l'esposizione su periodi brevi per una qualsiasi attività viene quantificata mediante il più alto dei valori misurati di a_v . Il valore di questa quantità da utilizzare nel contesto della valutazione del rischio è il più alto dei valori ottenuti per le diverse attività che compongono la giornata lavorativa. Nel caso di gruppi omogenei, ad ogni lavoratore si attribuisce il più alto dei valori misurati sui soggetti campionati.

2.6.10 Metodi di misura alternativi

Diverse patologie quali lombalgie, spondilosi, osteocondrosi, ernia discale, sono attualmente ritenute più direttamente legate alla esposizione ripetuta a picchi di accelerazione che non al valore medio di quest'ultima. Pertanto gli effetti di esposizioni di tipo impulsivo possono risultare non correttamente stimati, e sovente addirittura sottostimati, dalla metodica base illustrata ai precedenti punti 2.6.1 - 2.6.8.

Per discriminare vibrazioni impulsive da vibrazioni non impulsive, la norma UNI ISO 2631-1 utilizza il parametro *fattore di cresta* (CF), definito come il rapporto tra il picco massimo di accelerazione ponderata registrato nel tempo di misura T , a_{w-Peak} , e il valore efficace (r.m.s.) dell'accelerazione ponderata a_w , per ciascuno dei tre assi, sullo stesso tempo di misura:

$$CF = \left| \frac{a_{w-Peak}}{a_w} \right|_T$$

La norma indica un valore critico $CF = 9$. Per CF inferiore a 9, la vibrazione è prevalentemente non impulsiva ed il metodo base con descrittore A(8) risulta efficiente. Per CF superiore a 9, la vibrazione è prevalentemente impulsiva e sono raccomandati metodi aggiuntivi di valutazione, ovvero:

- quello della quarta potenza della dose delle vibrazioni, caratterizzato dal descrittore VDV;
- quello dei valori r.m.s. costanti, caratterizzato dal descrittore MTWV (acronimo dall'inglese *maximum transient vibration value*).

Per la valutazione delle componenti impulsive, il calcolo del solo CF può tuttavia risultare insufficiente, non permettendo la discriminazione tra la presenza occasionale di tali componenti e quella ricorrente. Pertanto viene suggerita l'adozione di metodi addizionali in aggiunta al metodo di base, ai fini della valutazione del comfort e dei rischi per la salute, quando vengano superati i seguenti valori critici:

$$\frac{\text{MTVV}}{a_w} = 1,5 \qquad \frac{\text{VDV}}{a_w \sqrt[4]{T}} = 1,75$$

La norma UNI ISO 2631-1 raccomanda di riportare le risultanze sia del metodo di valutazione tradizionale (r.m.s.) sia dell'eventuale metodo alternativo utilizzato (VDV o MTVV). Essa tuttavia non fornisce dei criteri per l'interpretazione dei risultati, nel caso in cui le evidenze risultassero in disaccordo.

Si ribadisce in conclusione che nessuno di questi due metodi è citato nel d.lgs. 81/2008 e s.m.i. Tuttavia il metodo della quarta potenza della dose di vibrazioni è citato nella direttiva 2002/44/CE nella quale compaiono anche i relativi valori soglia (vedi Appendice A). Nell'Appendice H vengono riportati alcuni esempi applicativi dei concetti espressi in questa sezione 2.6.

Metodo della quarta potenza della dose di vibrazioni

Il metodo alla quarta potenza della dose di vibrazioni utilizza, come detto, il descrittore cumulato di esposizione detto VDV così definito:

$$\text{VDV}(T) = \sqrt[4]{\int_0^T a_w(t)^4 dt} \quad \text{m/s}^{1,75}$$

dove:

- $a_w(t)$ è l'accelerazione istantanea ponderata in frequenza;
- T è la durata del tempo totale di esposizione;
- t è il tempo (variabile di integrazione).

Per una trattazione di dettaglio sul metodo VDV si rimanda all'appendice A, mentre nell'appendice H.5 viene riportato un esempio sul suo utilizzo.

Metodo dei valori r.m.s. costanti

Il metodo dei valori r.m.s. costanti si basa sul calcolo dell'accelerazione (ponderata) istantanea ed utilizza come descrittore il valore massimo nel tempo di tale quantità, detto MTVV e definito come segue:

$$\text{MTVV}(t_0) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0-\tau}^{t_0} a_w^2(t) dt} \quad \text{m/s}^{1,75}$$

dove:

- $a_w(t)$ è l'accelerazione istantanea ponderata in frequenza;
- τ è il tempo di integrazione per la definizione della media; la norma UNI ISO 2631-1 raccomanda il valore $\tau = 1$ secondo, corrispondente alla costante del tempo di integrazione *slow* nell'acustica;
- t è il tempo (variabile di integrazione);
- t_0 è l'istante al quale si riferisce il calcolo di MTWV.

Per una trattazione di dettaglio del metodo MTWV si rimanda all'Appendice B.

Metodi biomeccanici

Il metodo proposto dallo standard ISO 2631-5 è il primo che, in uno standard tecnico, propone l'utilizzo di un descrittore interno (la pressione generata nei dischi intervertebrali a seguito della vibrazione) in luogo di un tradizionale descrittore esterno (l'accelerazione misurata all'interfaccia uomo-macchina in conseguenza della vibrazione). Tale approccio di tipo 'biomeccanico' viene utilizzato nel caso di esposizioni a vibrazioni fortemente impulsive e caratterizzate da impatti ripetuti, come metodo supplementare che integra, quindi, quelli proposti dalla norma UNI ISO 2631-1, descritti ampiamente nei paragrafi precedenti.

Tali metodi si basano su misure che possono coincidere, ma sovente non coincidono, con quelle richieste per l'applicazione dei metodi descritti nella norma UNI ISO 2631-1. I risultati delle misure vengono quindi analizzati per fornire informazioni relative a possibili effetti avversi sulla salute dei dischi intervertebrali della parte lombare della colonna di individui seduti, dovuti a fenomeni compressivi.

Lo standard distingue due regimi di esposizione.

- a) Nel primo regime si manifestano condizioni espositive severe che sono tipiche dei veicoli militari fuoristrada o delle imbarcazioni ad alta velocità, ecc. Queste condizioni severe possono contenere periodi di caduta libera, sono dominate da accelerazioni nell'asse z e i soggetti possono perdere il contatto con la superficie del sedile a causa dell'esposizione. Questo regime 'severo' viene trattato nella parte principale e negli Allegati C e D del suddetto standard. I requisiti per la misura (larghezza della banda, condizionamento del segnale) differiscono da quelli indicati nella norma UNI ISO 2631-1 e i contributi delle forze di natura compressiva lungo gli assi x e y , ovvero perpendicolari all'asse principale della colonna vertebrale, vengono trascurati poiché l'esposizione dominante è nella direzione z .
- b) Nel secondo regime si hanno condizioni espositive meno severe, senza eventi a caduta libera e con il soggetto che rimane seduto per tutta la durata della misurazione. Queste esposizioni sono più probabili in un contesto industriale come, ad esempio, la guida di trattori o di macchine forestali e, in generale, la guida su superfici irregolari (fuoristrada, buche, frequenti attraversamenti di binari ferroviari, ecc.). Queste condizioni sono trattate negli Allegati A ed E dello standard ISO 2631-5, nei quali sono anche indicati i requisiti per la misura.

In entrambi i regimi il descrittore prevede un'integrazione temporale su tutta la durata dell'esposizione, e pertanto è di fatto correlato alla dose integrata di vibrazione.

Nel caso dell'esposizione severa a) lo standard propone un descrittore di rischio chiamato *daily compressive dose* S^a_d (in MPa) che rappresenta la dose compressiva sul rachide lombare causata dalle vibrazioni generate dal veicolo. Da questa, tenendo conto dell'età del soggetto e degli anni di esposizione, si calcola la *stress variable* R (adimensionale). Se la *stress variable* R risulta superiore a 1,42 (0,87 per le donne) vi è un'alta probabilità di osservare lesioni discoli lombari causate dall'esposizione cumulativa a vibrazioni.

Nel caso dell'esposizione meno severa b), invece, lo standard propone un descrittore di rischio analogo chiamato *daily compressive dose* S^a_d (in MPa), che rappresenta la dose compressiva sul rachide lombare causata dalle vibrazioni generate dal veicolo. Da questa, tenendo conto dell'età del soggetto e degli anni di esposizione, si calcola il *risk factor* R^a (adimensionale). Se quest'ultimo fattore risulta superiore a 1,2 vi è un'alta probabilità di osservare patologie discoli lombari causate dall'esposizione cumulativa a vibrazioni.

In conclusione, il metodo proposto dalla ISO 2631-5 introduce, pertanto, una significativa innovazione normativa che, in linea di principio, consente una valutazione del rischio molto più in linea con le attuali conoscenze scientifiche sulla risposta umana alle WBV, specie quelle ad alto contenuto impattivo. Tuttavia, il calcolo di tali descrittori necessita di software dedicato per l'implementazione degli algoritmi contenuti nello standard, software ad oggi ancora molto complessi da utilizzare e di non facile reperibilità. Per questo motivo nel presente documento si è deciso di non affrontare con maggior dettaglio questa metodologia, nell'attesa, si spera breve, che diventino fruibili strumenti commerciali di facile utilizzo a supporto degli utenti.

2.7 INFORMAZIONI FORNITE DAL FABBRICANTE

2.7.1 Conformità alla vecchia e alla nuova direttiva macchine

Come anticipato nella sezione 2.4, oltre che mediante misure e mediante l'utilizzo di BDV, l'accelerazione associata all'utilizzo di un dato utensile/veicolo può essere determinata anche sulla base delle informazioni fornite in materia dal costruttore dell'attrezzatura. Queste informazioni sono reperibili all'interno del libretto d'uso e manutenzione, nel quale esse devono essere riportate secondo quanto indicato nella specifica versione della direttiva macchine ('vecchia' o 'nuova') ai sensi della quale l'attrezzatura è stata certificata.

Vecchia direttiva macchine

La prima (vecchia) versione della direttiva macchine (89/392/CEE, poi sostituita dalla 98/37/CE), recepita in Italia con il d.p.r. 459/1996, contiene al punto 3.6.3 diverse indicazioni riguardo alle informazioni che devono essere fornite relativamente alle vibrazioni generate dall'attrezzatura. Di seguito si riporta il testo dell'art. 3.6.3:

Art. 3.6.3. Istruzioni per l'uso

Le istruzioni per l'uso devono contenere, oltre alle indicazioni minime di cui al punto 1.7.4, le seguenti indicazioni:

- a) per quanto riguarda le vibrazioni della macchina, il valore effettivo o un valore stabilito in base a misurazioni effettuate su una macchina identica:
- il valore quadratico medio ponderato, in frequenza, dell'accelerazione cui sono esposte le membra superiori quando superiori a $2,5 \text{ m/s}^2$; se tale livello è inferiore o pari a $2,5 \text{ m/s}^2$, occorre indicarlo;
 - il valore quadratico medio ponderato, in frequenza, dell'accelerazione cui è esposto il corpo (piedi o parte seduta) quando superiori a $0,5 \text{ m/s}^2$; se tale livello è inferiore o pari a $0,5 \text{ m/s}^2$, occorre indicarlo.
- Allorché non sono applicate le norme armonizzate, i dati sulle vibrazioni devono essere misurati usando il codice di misurazione più appropriato adeguato alla macchina. Il fabbricante deve indicare le condizioni di funzionamento della macchina durante la misurazione ed i metodi usati per le misurazioni;
- b) nel caso di macchine che consentono vari usi a seconda dell'attrezzatura impiegata, il fabbricante della macchina di base su cui possono essere fissate attrezzature intercambiabili e il fabbricante di queste ultime devono dare le informazioni necessarie per consentirne il montaggio e l'uso in condizioni di sicurezza.

Nuova direttiva macchine

La seconda (nuova) versione della direttiva macchine (2006/42/CE), recepita in Italia con il d.lgs. n.17 del 27 gennaio 2010, contiene al punto 3.6.3.1 diverse indicazioni riguardo alle informazioni che devono essere fornite relativamente alle vibrazioni generate dall'attrezzatura. Di seguito si riporta il testo dell'art. 3.6.3.1:

Art. 3.6.3.1. Vibrazioni (macchine mobili)

Le istruzioni devono fornire le seguenti indicazioni relative alle vibrazioni trasmesse dalla macchina al sistema mano-braccio o a tutto il corpo:

- il valore totale di vibrazioni cui è esposto il sistema mano-braccio, quando superiori a $2,5 \text{ m/s}^2$; se tale livello è inferiore o pari a $2,5 \text{ m/s}^2$, deve essere indicato;
- il valore quadratico medio massimo dell'accelerazione ponderata cui è esposto tutto il corpo, quando superiori a $0,5 \text{ m/s}^2$; se tale livello è inferiore o pari a $0,5 \text{ m/s}^2$, deve essere indicato;
- l'incertezza della misurazione.

I suddetti valori devono essere quelli misurati effettivamente sulla macchina in questione, oppure quelli stabiliti sulla base di misurazioni effettuate su una macchina tecnicamente comparabile rappresentativa della macchina da produrre.

Allorché non sono applicate le norme armonizzate, i dati sulle vibrazioni devono essere misurati usando il codice di misurazione più appropriato adeguato alla macchina.

Devono essere descritte le condizioni di funzionamento della macchina durante la misurazione e il codice di misurazione utilizzato per effettuarla.

sono stati sviluppati e pubblicati in numerosi esempi di applicazioni di vibrazioni

- la serie ISO 8662, realizzata fra il 1988 e il 1998, per la prova di utensili pneumatici;
- la serie ISO 6871, per la prova di utensili pneumatici, e la serie EN 50144, realizzata fra il 1995 e il 2007, per la prova di utensili pneumatici.

1. **test di affidabilità** (per la valutazione della durata di vita e della affidabilità)

2. **test di affidabilità** (per la valutazione della durata di vita e della affidabilità)

corr, che tengono conto di

il valore di accelerazione dichiarato dal costruttore, il valore totale di vibra-

corr,

Detto a_{dich} il valore di accelerazione dichiarato dal costruttore, il valore totale di vibra-

zione, equivalente a quello calcolato dai valori misurati come descritto nella sezione 2.5.6, si ottiene come:

$$a_{hv} = F_{corr} \times a_{dich}$$

Poiché nella dichiarazione non è previsto alcun valore di incertezza, la stima dell'incertezza associata al valore desunto dal dato dichiarato dal costruttore avviene secondo metodi ad-hoc sviluppati in questo documento (vedi Appendice F.2.3).

Nuova direttiva macchine

All'atto dell'emanazione della nuova direttiva macchine, i competenti comitati tecnici ISO e CEN hanno verificato che gli esistenti standard di prova non risultavano in grado di rispondere pienamente a quanto richiesto dalla direttiva ai fini di una corretta dichiarazione dei dati da parte dei produttori.

Per ovviare a tali deficienze, si è provveduto all'emanazione di nuovi standard di prova. In particolare per quanto riguarda le vibrazioni HAV, le nuove metodiche di misura standardizzate per la certificazione di tutti i macchinari sono state codificate nello standard ISO 20643:2005, oggi recepito nella sua versione corretta nella norma UNI EN ISO 20643:2012 'Vibrazioni meccaniche - Macchine portatili e condotte a mano - Principi per la valutazione della emissione di vibrazioni'. La norma specifica i requisiti di base sulla base dei quali sono successivamente stati redatti per tutti gli standard di prodotto. In particolare essa richiede che vengano forniti elementi riguardo a:

- direzioni di misurazione;
- strumentazione e trasduttori;
- condizioni di prova e di funzionamento;
- numero delle misurazioni eseguite per determinare il valore di emissione delle vibrazioni;
- scarto tipo previsto della riproducibilità della dichiarazione per dedurre l'incertezza K, seguendo il procedimento illustrato nella norma UNI EN 12096:1999 'Vibrazioni meccaniche - Dichiarazione e verifica dei valori di emissione vibratoria'.

La norma UNI EN ISO 20643 dichiara esplicitamente che: *Le procedure di prova per le vibrazioni basate sul presente documento dovrebbero definire le procedure di misurazione che forniscono risultati accurati e riproducibili che sono il più possibile concordanti con i valori di vibrazione misurati sulle superfici di contatto fra mano e macchina in reali condizioni di lavoro e per cui sono quantificate le incertezze di misurazione.*

È pertanto evidente che le vibrazioni prodotte dagli utensili certificati in conformità alla nuova direttiva macchine sono state misurate secondo standard di prova nei quali sono previste condizioni di impiego realistiche, come esplicitamente indicato dalla norma UNI EN ISO 20643. Esempi di standard di 'nuovo' tipo sono:

- la serie ISO 28927, realizzata fra il 2009 e il 2012, per la prova di utensili pneumatici;
- la serie IEC 60745 e la serie EN 50144 realizzate dopo il 2008, per la prova di utensili elettrici attualmente tutti vigenti.

Questo capitolo ha lo scopo di fornire informazioni generali sulle vibrazioni e sulla responsabilità del progettista e dell'utente. Si è cercato di essere sintetici e di fornire informazioni essenziali per il progettista e l'utente.

Tabella 8 Prospetto sintetico degli standard di misura delle vibrazioni prodotte dagli utensili ai fini della dichiarazione dei valori di emissione

Tipologia di utensile	Norme di vecchia generazione Condizioni di prova artificiali	Norme di nuova generazione Condizioni di prova realistiche
Pneumatico	UNI EN ISO 28662	UNI EN ISO 28927
Elettrico	CEI EN 60745 - CEI EN 50144 (fino al 2007)	CEI EN 60745 - CEI EN 50144 (dal 2008)

$$a_{hv} = a_{dich}$$

- il macchinario non è usato in maniera conforme a quanto indicato dal costruttore;
- il macchinario non è in buone condizioni di manutenzione;
- date di dichiarazione e dati di certificazione particolari e differenti da quelle indicate.

2.7.3 Indicazioni sulle WBV

Le norme di riferimento per la valutazione delle vibrazioni sono:

- UNI EN ISO 7096:2002 - Macchine di movimento terra - Valutazioni di laboratorio delle vibrazioni
- UNI EN ISO 1159:2004 - Sicurezza dei carrelli industriali - Metodi di prova per la misurazione delle vibrazioni
- UNI EN ISO 13496:2005 - Carrelli industriali - Valutazione in laboratorio delle vibrazioni
- UNI EN ISO 4254-1:2006 - Macchine agricole - Sicurezza - Parte 1: requisiti generali. Al contrario di ciò che è avvenuto per le vibrazioni mano-braccio (vedi il precedente

punto 2.7.2), per le vibrazioni corpo-intero non sono stati individuati opportuni fattori di correzione, per cui i valori forniti dal costruttore devono essere utilizzati tal quali, fermo restando che le stime in tal modo ottenute per le vibrazioni alle quali l'operatore è stato realmente esposto, sono inevitabilmente meno attendibili.

Nuova direttiva macchine

All'atto dell'emanazione della nuova direttiva macchine, i competenti comitati tecnici ISO e CEN hanno verificato che gli esistenti standard di prova non risultavano in grado di rispondere pienamente a quanto richiesto dalla direttiva ai fini di una corretta dichiarazione dei dati da parte dei produttori.

Per ovviare a tali deficienze, si è provveduto all'emanazione di nuovi standard di prova. In particolare per quanto riguarda le vibrazioni WBV, le nuove metodiche di misura standardizzate per la certificazione di tutti i macchinari sono state codificate nella norma UNI EN 1032:2009 - Vibrazioni meccaniche - Esame di macchine mobili allo scopo di determinare i valori di emissione vibratoria. Sulla base di questa norma sono stati emanati numerosi nuovi standard di prodotto in grado di rispondere ai requisiti stabiliti dalla direttiva. Ciò fa sì che le vibrazioni prodotte dalle macchine certificate in conformità alla nuova direttiva macchine siano misurate secondo standard di prova nei quali sono previste condizioni di impiego realistiche. Esempi di standard di 'nuovo' tipo, tuttora vigenti, sono:

- UNI EN ISO 7096:2009 - Macchine movimento terra - Valutazioni di laboratorio delle vibrazioni trasmesse al sedile dell'operatore;
- UNI EN 13059:2008 - Sicurezza dei carrelli industriali - Metodi di prova per la misurazione delle vibrazioni;
- UNI EN 13490:2009 - Vibrazioni meccaniche - Carrelli industriali - Valutazione in laboratorio e specifica delle vibrazioni trasmesse all'operatore dal sedile;
- UNI EN ISO 4254-1:2015 - Macchine agricole - Sicurezza - Parte 1: requisiti generali la quale è supportata a livello tecnico dallo standard ISO 5008:2002 - Agricultural wheeled tractors and field machinery - Measurement of whole-body vibration of the operator.

In sintesi, per tutti i macchinari, certificati sia in conformità alla vecchia che alla nuova direttiva macchine, il dato di accelerazione utilizzabile nel contesto della valutazione del rischio coincide con il dato dichiarato, ovvero:

$$a = a_{dich}$$

È importante chiarire che, seguendo le indicazioni contenute nelle norme tecniche di certificazione, nella grande maggioranza dei casi il fabbricante non dichiara le singole accelerazioni assiali, ma soltanto l'accelerazione sull'asse dominante o più raramente il valore totale di vibrazione. In assenza dei dati individuali sulle tre accelerazioni assiali, il percorso disegnato nella UNI ISO 2631-1 per il calcolo di A(8), e qui illustrato ai punti 2.6.7 e 2.6.8, risulta impossibile da seguire. Pertanto in tutti quei casi nei quali le singole accelerazioni assiali non vengono dichiarate dal fabbricante, si raccomanda di non utilizzare il valore dichiarato e di procedere eseguendo misure o recuperando il dato nella BDV.

Si puntualizza inoltre che i dati forniti dal costruttore non possono essere utilizzati nel caso in cui:

- il macchinario non è usato in maniera conforme a quanto indicato dal costruttore;
- il macchinario non è in buone condizioni di manutenzione;
- il macchinario è usato in condizioni operative particolari e differenti da quelle indicate dal costruttore in sede di certificazione;
- i sedili sono rotti o in cattive condizioni di manutenzione;
- i sedili regolabili in peso non sono regolati in maniera adeguata dal lavoratore o se il sistema di regolazione è rotto;
- gli pneumatici e gli ammortizzatori non sono in buone condizioni di manutenzione.

Va notato infine che i trattori agricoli e forestali non seguono la direttiva macchine ma una loro specifica direttiva trattori 2003/37/CE. Per i trattori omologati in conformità a questa direttiva, i valori di emissione vibratoria si intendono le caratteristiche di vibrazione in un piano verticale del sedile del conducente misurate in conformità alla direttiva 78/764/CEE. Per i trattori omologati in conformità al regolamento (UE) 167/2013, i valori di emissione vibratoria si intendono le caratteristiche di vibrazione in un piano verticale del sedile del conducente misurate in conformità all'Allegato XIV del regolamento delegato (UE) 1322/2014.

2.7.4 Periodi brevi

L'esposizione su periodi brevi va stimata in corrispondenza alle condizioni operative reali di massima esposizione. In assenza di elementi di dettaglio sui valori dichiarati dal fabbricante, l'esposizione su periodi brevi per una qualsiasi attività viene quantificata mediante il valore dichiarato. L'esposizione su periodi brevi da utilizzare nel contesto della valutazione del rischio è il più alto dei valori ottenuti per le diverse attività che compongono la giornata lavorativa.

2.8 BANCHE DATI VIBRAZIONI (BDV)

Come anticipato nella sezione 2.4, per la valutazione del rischio vibrazioni si può procedere facendo riferimento anche ad appropriate informazioni reperibili da banche dati accreditate (Inail, Regioni).

Nonostante l'affidabilità delle banche dati sia fortemente legata all'esistenza e all'adozione di procedure che garantiscano l'attendibilità delle metodologie con cui i valori vengano misurati, è sempre utile fare una valutazione preliminare con i dati riportati in letteratura, e quindi in banca dati, prima di procedere a misurazioni sul campo.

In generale una banca dati di vibrazioni (BDV) dovrebbe avere lo scopo di garantire un'agevole reperibilità dei valori di accelerazione prodotti da una notevole quantità di macchinari, i quali possono essere utilizzati per:

- verificare il rispetto o il superamento dei valori soglia di legge e assegnare la corretta classe di rischio;

- verificare la compatibilità del macchinario con il valore limite di esposizione su tempi brevi, con potenziale esclusione dal mercato di attrezzature con eccessivi livelli di vibrazione, ovvero tali da produrre un superamento dei valori limite di esposizione per periodi brevi (sezione 2.3.1 Tabella 4 e sezione 2.3.2 Tabella 6);
- consentire ai datori di lavoro, ed ai loro consulenti, di orientarsi, in fase di acquisto di nuovi macchinari, verso attrezzature che producano il minore livello di vibrazioni, a parità di prestazioni offerte;
- favorire il più possibile l'attuazione immediata di interventi di riduzione del rischio alla fonte.

Infine, avendo il costruttore l'obbligo di valutare in sede progettuale lo 'stato dell'arte' delle vibrazioni prodotte da macchinari della stessa famiglia (art. 1.5.9 della direttiva macchine), una BDV ha l'ulteriore compito di poter essere utilizzata come riferimento di dati comparativi di valori di vibrazioni emessi da macchine simili.

Tra le BDV esistenti, l'unica che attualmente soddisfa i requisiti richiesti dal d.lgs. 81/2008, art. 202 comma 2, è quella riportata nel Portale agenti fisici (PAF), per la cui descrizione si rimanda all'Appendice E.

2.8.1 Periodi brevi

L'esposizione su periodi brevi va stimata in corrispondenza alle condizioni operative reali di massima esposizione. In assenza di elementi di dettaglio sulle misure riportate nella BDV, l'esposizione su periodi brevi per una qualsiasi attività è quantificata pari alla somma del valore medio più una deviazione standard da ripetibilità (vedi Appendice F). Entrambe queste quantità sono da riferirsi al valore totale di vibrazione, come già discusso ai punti 2.5.8 e 2.6.9. L'esposizione su periodi brevi da utilizzare nel contesto della valutazione del rischio è il più alto dei valori ottenuti per le diverse attività che compongono la giornata lavorativa.

2.9 RELAZIONE TECNICA DI MISURA

Non esiste un modo univoco per presentare il risultato della valutazione delle vibrazioni meccaniche. Anche alla luce di quanto proposto dal Coordinamento tecnico delle regioni e delle province autonome, si ritiene che la Relazione tecnica (da non confondere con il DVR di cui, al massimo, è un allegato) innanzitutto debba prevedere due capitoli distinti, uno per il 'mano-braccio' e l'altro per il 'corpo intero'. Per entrambi i capitoli bisogna riportare:

- i dati aziendali e le relative figure responsabili in materia di sicurezza sul lavoro;
- il nominativo e la qualificazione della persona che ha redatto la suddetta relazione ed eventualmente effettuato la valutazione del rischio;
- le sorgenti (attrezzature/macchine) di vibrazioni con le relative modalità d'utilizzo;
- le condizioni espositive (descrizione dei cicli lavorativi e tempi di esposizione) riferite alla giornata ricorrente a massimo rischio oggetto di valutazione;

la modalità con la quale sono stati determinati i valori di esposizione (in accordo con quanto riportato nella sezione 2.4), in particolare:

- nel caso di utilizzo di dati riportati in BDV presi sul campo: l'attrezzatura, l'utensile ed il supporto cui la misura utilizzata fa riferimento (HAV) o la macchina/attrezzatura, il tipo di sedile, le condizioni del fondo, l'attrezzo eventualmente utilizzato e la velocità d'utilizzo cui la misura utilizzata fa riferimento (WBV), oltre ovviamente alla fonte della BDV;
- nel caso di utilizzo di dati forniti dai costruttori: il dato indicato dal fabbricante ed il fattore correttivo utilizzato;
- nel caso di utilizzo di dati ottenuti tramite misurazione: le indicazioni sulla strumentazione utilizzata (marca, modello, taratura, tecnica di fissaggio degli accelerometri), le condizioni di utilizzo dell'attrezzatura da parte dell'operatore, le condizioni di lavoro durante le quali la misura è stata effettuata e l'errore associato ad ogni misura.

La Relazione Tecnica si deve concludere con l'attribuzione di un valore di A(8) a ciascuno dei lavoratori considerati 'non giustificati' (vedi la successiva sezione 3.2), con gli elementi richiesti dall'art. 202, comma 5 del d.lgs. 81/2008 e con le indicazioni specifiche per la riduzione del rischio ai sensi dell'art. 203 compresa l'indicazione dell'esistenza di attrezzature alternative progettate per ridurre i livelli di esposizione alle vibrazioni.

2.10 INCERTEZZA

A differenza di quanto previsto per la valutazione del rischio rumore, nel Capo III del Titolo VIII del d.lgs. 81/2008 non viene richiesto al DL di tenere conto dell'incertezza delle misure nel quadro della valutazione del rischio vibrazioni.

È tuttavia innegabile che la stima dell'incertezza rappresenti un elemento importante di qualsiasi misura strumentale. Pertanto pare opportuno che se ne tenga conto conformemente a quanto prescritto dalla buona prassi metrologica e quindi anche della misura di vibrazioni meccaniche.

Sia la norma UNI EN ISO 5349-1:2004 (per le HAV) che la norma UNI ISO 2631-1:2014 (per le WBV) sottolineano la necessità di provvedere al calcolo dell'incertezza della misura; tuttavia, all'interno di tali documenti, non risulta evidenziata la modalità, né esiste alcun riferimento ad altri testi specialistici, per la determinazione dell'incertezza in questione.

Una stima molto grossolana viene fornita dalla norma UNI EN ISO 5349-2:2015, che nella propria sezione 8 indica per il descrittore di esposizione A(8) un'incertezza pari al 20 - 40% del valore delcalcolato del descrittore stesso. Il documento tecnico redatto dal Coordinamento delle Regioni e delle Province autonome suggerisce che lo stesso intervallo di valori possa essere ragionevolmente esteso anche al descrittore di esposizione WBV. Stime simili, ma non identiche, provengono dalla 'Guide to good practice on hand-arm vibration' (le linee guida non vincolanti dell'Unione europea) nella quale viene affermato che, nel caso sia l'accelerazione sia il tempo di esposizione siano stati

misurati, *'le incertezze associate al calcolo di A(8) implicano che il valore calcolato può essere fino al 20% più alto e fino al 40% più basso del valore vero'*. Dunque si ipotizza un intervallo di confidenza asimmetrico.

Complessivamente queste indicazioni non soltanto appaiono grossolane, ma possiedono anche due grosse lacune:

- non consentono di comprendere quale sia la fonte dominante di incertezza e quindi non consentono di intraprendere azioni correttive efficienti per ridurre l'incertezza complessiva;
- essendo state sviluppate assumendo che la stima del descrittore di accelerazione A(8) venga ottenuta attraverso misure, non possiedono alcun valore nel caso in cui l'accelerazione venga stimata con gli altri due metodi consentiti dalla legge (informazioni reperite dalla BDV o fornite dal costruttore nel libretto dell'utensile/macchinario).

Appare pertanto importante creare un percorso più articolato per giungere ad una miglior stima dell'incertezza associata al descrittore di esposizione.

Come nel caso dell'esposizione professionale a rumore, possono essere in generale identificati quattro contributi all'incertezza da associare all'accelerazione sulla base della quale viene eseguito il calcolo dell'esposizione professionale a vibrazioni:

- 1) un'incertezza legata alle modalità con le quali viene determinata la miglior stima del descrittore;
- 2) un'incertezza legata alle caratteristiche della strumentazione utilizzata;
- 3) un'incertezza legata al posizionamento del sensore;
- 4) un'incertezza legata al tempo di esposizione.

L'incertezza complessiva viene determinata sommando opportunamente questi contributi.

Per una trattazione maggiormente dettagliata sull'incertezza si rimanda all'Appendice F nella quale viene presentato un metodo originale, sviluppato sulla falsariga di quello illustrato nella norma UNI EN ISO 9612 per l'incertezza associata al descrittore di esposizione al rumore L_{EX} , ed in coerenza con le indicazioni generali sul calcolo dell'incertezza fornite dalla norma UNI CEI 70098-3:2016.

3. IL DOCUMENTO DI VALUTAZIONE DEL RISCHIO

3.1 LE FASI DELLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO

In generale la valutazione del rischio può schematicamente essere esplicitata attraverso le seguenti fasi:

- a) possibile giustificazione del rischio (sezione 3.2);
- b) identificazione delle condizioni espositive da valutare (sezione 3.3);
- c) quantificazione dell'esposizione (sezione 3.4);
- d) valutazione di altri elementi di cui tenere conto (sezione 3.5);
- e) eventuale redazione del programma di misure tecniche (sezione 3.6), comprensivo dell'uso mirato dei dispositivi di protezione individuali (sezione 3.7);
- f) adozione di metodi di lavoro ergonomicamente adeguati (sezione 3.8);
- g) formazione e informazione dei soggetti esposti (sezione 3.9);
- h) sorveglianza sanitaria (sezione 3.10).

Nel caso del rischio da vibrazioni le suddette fasi vengono di seguito descritte.

3.2 LA GIUSTIFICAZIONE DEL RISCHIO

Il primo passo della valutazione consiste nel verificare se il tipo di produzione/servizio dell'azienda evidenzia esposizioni palesemente inferiori ai valori di azione. Secondo le Indicazioni operative del Coordinamento tecnico delle Regioni e delle Province autonome, è possibile terminare la valutazione del rischio con il ricorso alla 'giustificazione' qualora, sulla base dell'osservazione delle modalità di lavoro e/o attingendo dalla BDV (da dati di letteratura o dai dati dei fabbricanti) o da misurazioni strumentali, si possa ritenere che le esposizioni siano palesemente esigue.

Se questo è il caso, si può applicare il concetto di giustificazione, ovvero l'assenza di ulteriori approfondimenti nel processo di valutazione, per mancanza oggettiva delle cause o delle sorgenti di rischio. La procedura si conclude con la 'giustificazione del rischio'. La 'giustificazione' deve riportare le evidenze dei fattori considerati e deve essere inserita nel documento di valutazione così come previsto dal comma 3 dell'articolo 181 del d.lgs. 81/2008. Potrebbe risultare utile, in tale ottica, utilizzare delle checklist di valutazione, mediante le quali vengono analizzati, contestualizzandoli, i rischi derivanti dalla trasmissione delle HAV e al corpo intero. La Tabella 9 riporta, a tal proposito, una check-list comunemente utilizzata.

Tabella 9			
Check list di valutazione per eventuale giustificazione del rischio			
HAV			
N.		SI	NO
1	Nell'attività dell'azienda si fa uso di attrezzature portatili o fisse che espongono a vibrazioni?		
2	I RLS segnalano esposizioni a vibrazioni o ci sono lavoratori che lamentano intorpidimenti o formicolii alle mani o alle braccia?		
3	Il MC nella sua valutazione o durante i sopralluoghi ha individuato lavorazioni che espongono a vibrazioni HAV?		
<i>Se la risposta è negativa a tutti i precedenti quesiti, è 'giustificata' la conclusione della valutazione. L'esito della check list può essere riportato nel DVR</i>			
<i>Se qualche risposta è positiva, la valutazione va approfondita e vanno identificate ed adottate le adeguate misure di prevenzione e protezione</i>			
WBV			
N.		SI	NO
1	Nell'attività dell'azienda si fa uso di veicoli, di macchine o di attrezzature di lavoro che espongono a WBV (es.: da sedili, da piattaforme, o piani)?		
2	I lavoratori e/o gli RLS segnalano eccessive a WBV?		
3	Il MC nella sua valutazione o durante i sopralluoghi ha individuato lavorazioni che espongono a vibrazioni WBV?		
<i>Se la risposta è negativa a tutti i precedenti quesiti, è 'giustificata' la conclusione della valutazione. L'esito della check list può essere riportato nel DVR</i>			
<i>Se qualche risposta è positiva la valutazione va approfondita e vanno identificate ed adottate le adeguate misure di prevenzione e protezione</i>			

Qualora, al contrario, non sia possibile escludere la presenza di un rischio di esposizione dei lavoratori, è necessario continuare il processo di valutazione del rischio secondo quanto previsto all'art. 202.

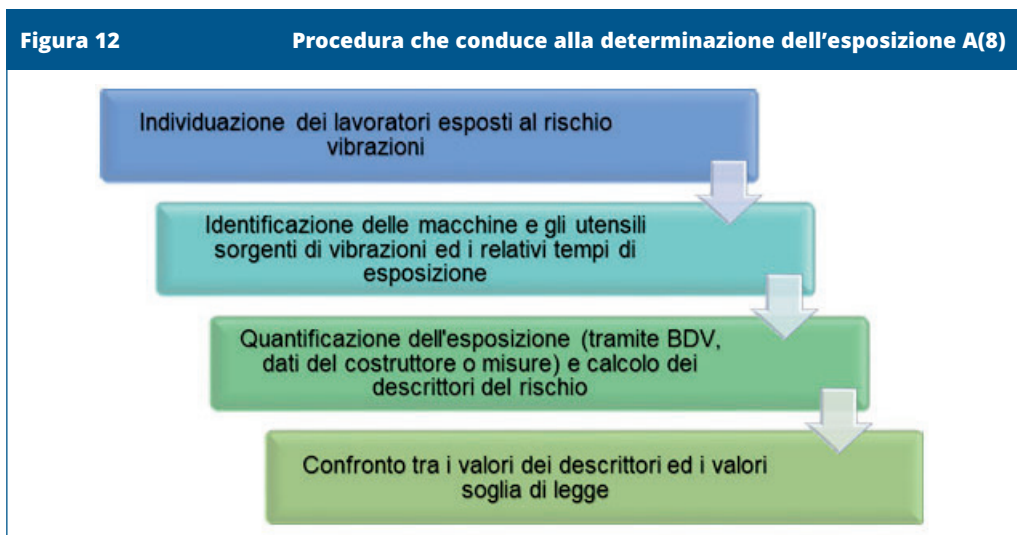
3.3 L'IDENTIFICAZIONE DELLE CONDIZIONI ESPOSITIVE DA VALUTARE

Nell'ipotesi in cui non sia possibile ricorrere alla giustificazione descritta alla precedente sezione 3.2, si procede all'identificazione delle condizioni espositive relativamente alle quali eseguire la valutazione del rischio. Nel caso di esposizione costante, qualsiasi giornata lavorativa risulta adeguata. Nel caso di esposizione variabile, l'art. 201 comma 2 del d.lgs. 81/2008 e s.m.i. prescrive di considerare *il livello giornaliero massimo ricorrente*, al fine di ottenere una stima sufficientemente cautelativa dell'esposizione.

L'esposizione va dunque determinata in riferimento alla cosiddetta 'giornata ricorrente a massimo rischio' ovvero la giornata nella quale si presenta un'esposizione a vibrazione particolarmente elevata, ma con caratteristiche di ricorrenza e che non è, pertanto, riferita ad attività espletate una tantum. Come criterio di massima si possono escludere quelle condizioni espositive giornaliere eccezionali che complessivamente non superano 2 giorni/anno.

3.4 LA QUANTIFICAZIONE DELL'ESPOSIZIONE

Come mostrato dal diagramma di flusso presentato nella Figura 12, una volta definito il corretto riferimento temporale, la valutazione del rischio procede con l'individuazione dei lavoratori esposti, l'identificazione delle macchine e gli utensili sorgenti di vibrazioni ed i relativi tempi di esposizione.



(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

A questo punto si procede con la quantificazione dell'esposizione la quale può avvenire, come illustrato nel capitolo 2, stimando l'accelerazione generata dai diversi utensili/veicoli mediante l'uso di BDV, informazioni fornite dal fabbricante o misure.

Una volta determinata l'esposizione, essa viene confrontata con i diversi valori soglia di legge. Per i valori numerici di questi ultimi si rimanda al punto 2.3.1 per le HAV o al punto 2.3.2 per le WBV.

Sulla base dell'esito di questo confronto, il DL verifica l'eventuale obbligo di:

- attuare misure di prevenzione e protezione, tra cui redigere un piano di riduzione del rischio vibrazioni;
- effettuare l'informazione e la formazione dei lavoratori;
- far effettuare la sorveglianza sanitaria a cura del MC.

3.5 ALTRI ELEMENTI DI CUI TENERE CONTO NELLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO

Come esplicitamente previsto dall'art. 202 comma 5, accanto al valore dell'esposizione a vibrazioni, la valutazione deve prendere in esame i seguenti fattori:

- a) gli eventuali effetti indiretti sulla sicurezza dei lavoratori risultanti da interazioni tra le vibrazioni meccaniche e l'ambiente di lavoro o altre attrezzature;
- b) condizioni di lavoro particolari come le basse temperature, il bagnato, l'elevata umidità, presenza di livelli elevati di rumore, il sovraccarico biomeccanico degli arti superiori e del rachide;
- c) l'esistenza di attrezzature alternative progettate per ridurre i livelli di esposizione a vibrazioni meccaniche;
- d) le informazioni fornite dal costruttore dell'apparecchiatura ai sensi della direttiva macchine;
- e) gli eventuali effetti sulla salute e sulla sicurezza dei lavoratori particolarmente sensibili al rischio.

Gli elementi a) e b) descrivono possibili effetti sinergici, ovvero concause la cui presenza può elevare il potenziale nocivo della vibrazione.

Gli elementi c) e d) vanno considerati nel contesto del programma delle misure tecniche mirate alla riduzione dell'esposizione (vedi sezione 3.6).

L'elemento e) va considerato nel contesto della sorveglianza sanitaria (sezione 3.9).

Infine viene redatto il documento, che diventa parte integrante del DVR (art. 28 del d.lgs. 81/2008), contenente il programma di miglioramento con le misure tecniche ed organizzative (vedi la successiva sezione 3.6).

3.6 IL PROGRAMMA DELLE MISURE TECNICHE E ORGANIZZATIVE

Ove, nell'ambito dello svolgimento delle attività lavorative, l'esposizione alle vibrazioni raggiunga o superi il valore di azione, occorre adottare le seguenti misure considerando, conformemente a quanto riportato nell'art. 203 del d.lgs. 81/2008:

- altri metodi di lavoro che richiedono una minore esposizione a vibrazioni meccaniche, come adottare obbligatoriamente sistemi di lavoro alternativi che generino meno vibrazioni e/o che consentano di ridurre al minimo la forza di pressione o spinta da applicare all'utensile e prevedendo, ove possibile, l'automazione e/o la remotizzazione della lavorazione;

la scelta di attrezzature di lavoro adeguate concepite nel rispetto dei principi ergonomici e che producono, tenuto conto del lavoro da svolgere, il minor livello possibile di vibrazioni ad esempio accertandosi, in fase di acquisto o sostituzione, che le attrezzature vibranti abbiano bassi valori di vibrazione (ad esempio con l'ausilio della BDV);

- la fornitura di attrezzature accessorie per ridurre i rischi di lesioni provocate dalle vibrazioni, quali sedili che attenuano efficacemente le vibrazioni trasmesse al corpo intero e maniglie o guanti che attenuano la vibrazione trasmessa al sistema mano-braccio: come adeguati DPI (si veda la sezione 3.7), o modificando le attrezzature esistenti (per le HAV rivestendo i manici con materiali smorzanti, per le WBV isolando la cabina con materiali smorzanti, aggiungendo o sostituendo gli ammortizzatori oppure installando sedili antivibranti attivi/passivi);
- adeguati programmi di manutenzione delle attrezzature di lavoro, del luogo di lavoro, dei sistemi sul luogo di lavoro e dei DPI effettuando la manutenzione regolare e periodica degli utensili, delle attrezzature e delle macchine e controllando, per i sedili di guida, il fine corsa e l'idonea regolazione (si veda capitolo 5);
- la progettazione e l'organizzazione dei luoghi e dei posti di lavoro pianificando, laddove possibile, i percorsi di lavoro e scegliendo quelli meno accidentati, oppure, effettuando lavori di livellamento stradale;
- l'adeguata informazione e formazione dei lavoratori sull'uso corretto e sicuro delle attrezzature di lavoro e dei DPI, in modo da ridurre al minimo la loro esposizione a vibrazioni meccaniche;
- la limitazione della durata e dell'intensità dell'esposizione riducendo il tempo durante il quale i lavoratori sono esposti a intense vibrazioni;
- l'organizzazione di orari di lavoro appropriati, con adeguati periodi di riposo adottando cicli lavorativi che consentano di alternare periodi di esposizione a vibrazioni a periodi in cui il lavoratore non sia esposto a vibrazioni;
- la fornitura, ai lavoratori esposti, di indumenti per la protezione dal freddo e dall'umidità indossando opportuni guanti, qualora si operi in un ambiente freddo.

Il programma delle misure tecniche e organizzative di cui sopra deve essere inserito nel DVR di tutte le aziende che hanno esposti al di sopra dei valori di azione e dovrebbe riportare, secondo il Coordinamento Tecnico delle Regioni e delle Province Autonome, almeno i seguenti elementi:

- l'elenco delle attività per le quali vi è il superamento dei valori di azione, descritti sia con i livelli di accelerazione presenti sia con i tempi di esposizione a tali livelli;
- le misure tecniche e/o organizzative che si intendono adottare;
- i risultati attesi a seguito delle suddette misure in termini di A(8);
- i tempi di attuazione di ogni singola misura;
- la funzione aziendale e la persona incaricata dell'attuazione della singola misura;
- la modalità di verifica dei risultati;
- la data ed i risultati della suddetta verifica.

Per un maggior approfondimento può essere utile la consultazione di due norme tecniche, la UNI/TR 11232-2:2007 per le HAV e la UNI CEN/TR 15172-2:2008 per le WBV, che indicano le misure praticabili per la riduzione ed il controllo dell'esposizione alle vibrazioni nei posti di lavoro, riportando esempi pratici.

3.7 I DPI 'ANTIVIBRAZIONE'

3.7.1 I DPI per le HAV

Come noto, si considera DPI qualsiasi attrezzatura o accessorio atto a proteggere la sicurezza e la salute del lavoratore rientrante nel campo di applicazione del d.lgs. 17/2019, che ha recepito il regolamento 2016/425 del Parlamento europeo e del Consiglio e modificato il d.lgs. 475/92.

In relazione alle HAV, sono attualmente in commercio (Figura 13) guanti cosiddetti 'antivibrazione' (o 'antivibranti'), certificati secondo la norma UNI EN ISO 10819:2013. Tali guanti, oltre ai benefici associati a tutti i guanti in termini di protezione delle mani dai rischi meccanici (abrasioni, tagli, ecc.), dalle temperature estreme, dai rischi chimici e dall'umidità, riducono la trasmissione delle vibrazioni alle mani e quindi assumono il ruolo di DPI in relazione al rischio in questione.

La citata norma armonizzata prescrive un metodo di laboratorio per la misura delle proprietà dinamiche dei guanti. Tale procedura individua in due quantità $\bar{T}_{(M)}$ e $\bar{T}_{(H)}$ i descrittori dell'attenuazione della vibrazione prodotta dal guanto. Le due quantità $\bar{T}_{(M)}$ e $\bar{T}_{(H)}$ sono entrambe trasmissibilità medie, ovvero sono calcolate come rapporto fra l'accelerazione misurata al palmo della mano che indossa il guanto e l'accelerazione misurata al palmo della mano nuda. Poiché la banda di frequenza M si estende da 25 Hz a 200 Hz, la quantità $\bar{T}_{(M)}$ descrive il comportamento del guanto a bassa frequenza. La banda di frequenza H si estende invece da 200 Hz a 1250 Hz, per cui la quantità $\bar{T}_{(H)}$ descrive il comportamento del guanto ad alta frequenza.

La norma UNI EN ISO 10819 afferma che per ricevere la designazione di *guanto antivibrazione* è necessario che le suddette trasmissibilità rispettino i seguenti requisiti:

$$\bar{T}_{(M)} \leq 0,90 \text{ e } \bar{T}_{(H)} \leq 0,60$$

e che le dita del guanto abbiano le stesse proprietà (in termini di materiali e spessore) della parte di guanto che copre il palmo della mano.

Va considerato in proposito che il soddisfacimento di detti criteri non implica che l'uso di tale guanto elimini il rischio di esposizione alle vibrazioni.

Come si vede dai requisiti indicati dalla norma UNI EN ISO 10819, l'efficacia dei guanti antivibranti è tipicamente significativa su una serie di attrezzi con vibrazioni di medio-alta frequenza, mentre l'efficacia risulta assai modesta su attrezzi con vibrazioni di bassa frequenza (ad esempio martelli demolitori e roto-perforatori). La Tabella 10, estratta dal PAF, fornisce valori tipici dell'attenuazione attesa nell'uso di guanti antivibranti con diverse tipologie di utensili.

Figura 13**Guanti antivibranti disponibili in commercio**

(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

Tabella 10**Prestazioni dei guanti antivibranti in rapporto all'attenuazione delle vibrazioni**

Utensili	Attenuazione attesa (%)
Martelli perforatori e picconatori	< 10
Utensili di tipo percussorio	< 10
Scalpellatori, scrostatori e rivettatori	< 10
Trapani a percussione	< 10
Avvitatori ad impulso	< 10
Martelli sabbiatori	< 10
Cesoie	< 10
Seghe circolari e seghetti alternativi	10 - 20
Decespugliatori	10 - 20
Motoseghe	10 - 20
Levigatrici	40 - 60
Smerigliatrici	40 - 60

Diversamente da quanto accade per il rischio rumore, si fa notare come il rispetto/superamento del valore limite di esposizione non venga verificato in presenza di DPI. In altre parole l'uso di guanti antivibranti è irrilevante ai fini del confronto con le soglie di legge.

3.7.2 I DPI per WBV

Le WBV, generate principalmente dall'interazione delle ruote o dai cingoli con le asperità del terreno, incluse buche e avvallamenti, e secondariamente dal motore, giungono all'operatore mediante la catena di trasmissione costituita dalle ruote, dagli assali, dal telaio della cabina e dal gruppo sedile.

Per quanto concerne le WBV, non esistono DPI. Per cercare di limitare queste vibrazioni, si possono invece utilizzare due tipi di dispositivi applicati non al lavoratore quanto al macchinario (Figura 14):

- a) i Silent Block, in grado di ridurre le vibrazioni trasmesse dal telaio alla cabina di una macchina movimento terra o di un trattore agricolo o forestale (Figura 15);
- b) i sedili antivibranti, in grado di ridurre le vibrazioni trasmesse dal telaio o dalla cabina all'operatore. Purtroppo, solo in pochi casi (come ad esempio i veicoli agricoli e forestali, le macchine movimento terra e le carrelli industriali) esistono norme di omologazione e certificazione, riportate nella Tabella 11. Si sottolinea come attualmente non ci sia ancora nessuna norma specifica sui sedili di tipo 'attivo' (dei quali si parlerà nel capitolo 4).

Figura 14 Sedile ammortizzato e Silent Block

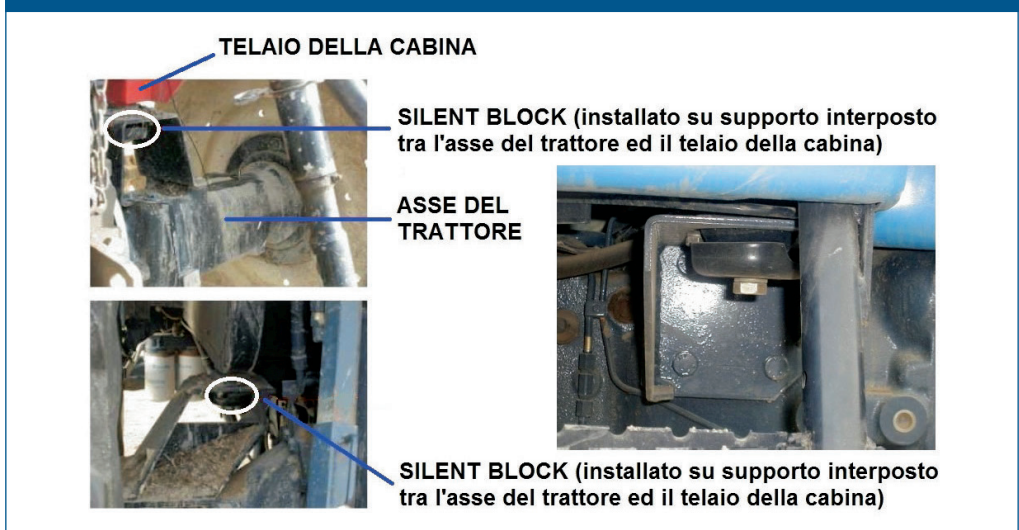


<https://www.grammer.com> - <https://www.ebay.it>

Tabella 11		Normativa relativa alla verifica dei sedili	
Riferimento	Tipologia	Settore/veicolo	Contenuti
Regolamento n.167/2013 del Parlamento europeo e del Consiglio	Legislazione europea	Agricolo e forestale	Omologazione e verifica del mercato
UNI EN ISO 10326-1:2016	Normativa tecnica	Molteplici	Requisiti generali per la verifica della trasmissibilità in laboratorio
UNI EN ISO 7096:2009	Normativa tecnica	Movimentazione terra	Verifica della trasmissibilità in laboratorio su nove tipi di macchine
UNI EN 13490:2009	Normativa tecnica	Carrelli industriali	Verifica della trasmissibilità in laboratorio su sette tipi di macchine
ISO 5007:2003	Normativa tecnica	Trattori agricoli su ruote	Valutazione dell'efficacia su tre intervalli di massa del veicolo

Figura 15

Installazione di Silent Block su trattore



(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

3.8 L'INFORMAZIONE E LA FORMAZIONE

Il DL è obbligato, ai sensi dell'art. 184 del d.lgs. 81/2008, a provvedere all'informazione ed alla formazione dei lavoratori esposti a rischi derivanti da agenti fisici sul luogo di lavoro. In particolare, per le vibrazioni, il programma informativo/formativo deve riguardare:

- a) le misure adottate volte ad eliminare o a ridurre al minimo il rischio;
- b) l'entità e il significato dei valori limite di esposizione e dei valori di azione nonché potenziali rischi associati;
- c) i risultati della valutazione, misurazione o calcolo dei livelli di esposizione (facendo riferimento alle potenziali lesioni derivanti dalle attrezzature di lavoro utilizzate);
- d) le modalità per individuare e segnalare gli effetti negativi dell'esposizione per la salute;
- e) le circostanze nelle quali i lavoratori hanno diritto a una sorveglianza sanitaria e agli obiettivi della stessa;
- f) le procedure di lavoro sicure per ridurre al minimo i rischi derivanti dall'esposizione;
- g) l'uso corretto di adeguati DPI e le relative indicazioni e controindicazioni sanitarie all'uso.

Nel caso delle vibrazioni, contrariamente a quanto avviene per il rumore, il d.lgs. 81/2008 non collega l'obbligo informativo/formativo al superamento di predeterminati valori di esposizione. A tal proposito il Coordinamento tecnico delle Regioni e delle Province Autonome dà come indicazione *'che l'obbligo della informazione/formazione degli esposti a vibrazioni debba concretizzarsi quando la valutazione dei rischi non può concludersi con la cosiddetta 'giustificazione' di non dover effettuare una valutazione dei rischi più dettagliata'* (si veda a tal riguardo la sezione 3.2).

Il Coordinamento tecnico, inoltre, ritiene che 'per garantire che gli interventi preventivi, sia tecnici che procedurali, diano gli esiti voluti quando questi dipendono in larga misura da fattori soggettivi e comportamentali' sia necessario, accanto ad un programma formativo, anche un percorso di addestramento, sebbene esso non sia specificatamente previsto nel Capo III del Titolo VIII del d.lgs.81/2008 per il rischio da vibrazioni. L'addestramento, mediante l'affiancamento a colleghi esperti, è fondamentale per comprendere meglio quale possa essere l'attrezzatura e l'utensile più adatto per un certo lavoro e quale sia il modo migliore per utilizzarli così da evitare o contenere le vibrazioni. Si sottolinea, infine, come i programmi informativi/formativi e l'addestramento debbano essere in particolare rivolti 'ai lavoratori esposti, particolarmente all'assunzione, in occasione del cambio di mansione, dell'assegnazione di una nuova attrezzatura di lavoro, dell'introduzione di interventi tecnici organizzativi o procedurali volti alla riduzione del rischio, della consegna dei DPI e nel corso degli accertamenti sanitari'.

Nello specifico, la formazione e l'informazione per ridurre e se possibile prevenire i rischi legati ad esposizioni a vibrazioni mano-braccio, devono essere focalizzate su:

- le corrette modalità di prensione e di impugnatura degli utensili;

- la necessità di dare tempestiva segnalazione di guasti e/o malfunzionamenti;
- l'adozione di procedure di lavoro idonee al riscaldamento delle mani prima e durante il turno di lavoro;
- l'incremento di rischio di danni da vibrazioni in soggetti fumatori;
- gli esercizi e massaggi alle mani da effettuare durante le pause di lavoro.

Analogamente, la formazione e l'informazione per ridurre e se possibile prevenire i rischi legati ad esposizioni a WBV, devono essere focalizzate su:

- metodi corretti di guida al fine di ridurre le vibrazioni; ad esempio la necessità di evitare alte velocità in particolare su strade accidentate;
- posture di guida e corretta regolazione del sedile;
- ulteriori fattori di rischio per disturbi a carico della colonna;
- come prevenire il mal di schiena;
- la necessità di dare tempestiva segnalazione di guasti e/o malfunzionamenti.

3.9 LA SORVEGLIANZA SANITARIA

La sorveglianza sanitaria è definita nell'art. 2 comma 1 del d.lgs 81/2008 come *'l'insieme degli atti medici, finalizzati alla tutela dello stato di salute e sicurezza dei lavoratori, in relazione all'ambiente di lavoro, ai fattori di rischio professionali e alle modalità di svolgimento dell'attività lavorativa'*. L'art. 204 del d.lgs. 81/2008 impone al DL di sottoporre a sorveglianza sanitaria tutti i lavoratori esposti a livelli di vibrazioni superiori ai valori d'azione (indicati nella sezione 2.3) nominando, di fatto, un MC (provisto dei requisiti di cui all'art. 38).

Oltre ai casi previsti dall'art. 41 comma 2, i lavoratori esposti a valori di vibrazioni meccaniche anche inferiori a quelli d'azione, possono essere sottoposti alla sorveglianza sanitaria quando, a giudizio del MC, 'si verificano una o più delle seguenti condizioni: l'esposizione dei lavoratori alle vibrazioni è tale da rendere possibile l'individuazione di un nesso tra l'esposizione in questione e una malattia identificabile o ad effetti nocivi per la salute ed è probabile che la malattia o gli effetti sopraggiungano nelle particolari condizioni di lavoro del lavoratore ed esistono tecniche sperimentate che consentono di individuare la malattia o gli effetti nocivi per la salute'. A tal proposito il Coordinamento Tecnico sottolinea come 'viene resa possibile al MC l'attuazione di accertamenti sanitari mirati nei confronti dei lavoratori esposti a vibrazioni anche al di sotto dei valori di azione se, ad esempio, questi prestano la loro attività lavorativa in presenza delle condizioni di lavoro particolari di cui alla lettera h) del comma 5 dell'art. 202, ossia che espongono a basse temperature, al bagnato, all'elevata umidità o al sovraccarico biomeccanico degli arti superiori e del rachide'.

Nel 1998 una rete di ricerca europea (VINET), di cui faceva parte anche l'Inail (a quel tempo Ipsesl), creata all'interno del programma di ricerca EC BIOMED 2, ha realizzato delle procedure generali per la sorveglianza sanitaria per le HAV e le WBV liberamente consultabili all'interno del report finale. In particolare sono stati sviluppati metodi per l'individuazione e la diagnosi di disturbi legati all'esposizione a vibrazioni e questionari standardizzati di valutazione da sottoporre sia in fase preassuntiva che di follow-up.

4. IL CONTROLLO DELLE VIBRAZIONI MECCANICHE DELLE MACCHINE

4.1 MODELLO MECCANICO DI UN SISTEMA AD UN GRADO DI LIBERTÀ

Nella maggior parte dei casi, una macchina è un sistema che risulta o vincolato ad un telaio, e quindi all'ambiente esterno, o direttamente collegato ad un utilizzatore se si tratta di una attrezzatura dotata di impugnatura.

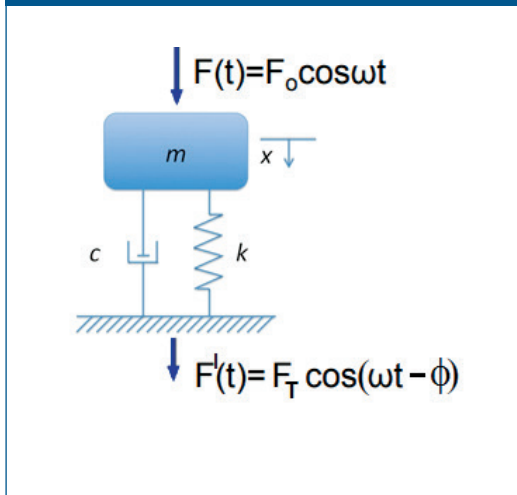
Se un tale sistema è soggetto a vibrazioni, queste risulteranno trasmesse, attraverso i vincoli, all'ambiente o all'utilizzatore e potranno esporre l'operatore al rischio specifico.

Nella Figura 16 viene illustrato in linea di principio il modo con cui una macchina semplice, schematizzata come un sistema massa-molla-smorzatore, si comporta in presenza di vibrazioni: in particolare la forza esterna $F(t)$, agendo sul sistema di massa m si trasmette, attraverso la molla di rigidità k e il dissipatore di smorzamento c , al basamento (che in questo caso rappresenta l'ambiente o l'operatore) con una forza risultante $F'(t)$.

In linea di principio il dissipatore rappresenta l'elemento principale in grado di ridurre le vibrazioni di una macchina ovvero ridurre le vibrazioni trasmesse verso l'ambiente e/o verso l'operatore. Quando in un sistema è presente un elemento smorzante le vibrazioni trasmesse dal sistema stesso verso l'esterno sono in genere ridotte. In generale, però, ciò non avviene quando la vibrazione a cui è sottoposto il sistema è caratterizzata da una particolare frequenza, detta appunto *frequenza di risonanza*. In questi casi, a seconda dell'entità del dissipatore e dell'ampiezza della vibrazione forzante, il sistema può addirittura amplificare le vibrazioni trasmesse. In un sistema semplice, come quello descritto, la frequenza di risonanza è unica e dipende semplicemente dal rapporto tra la rigidità della molla e la massa del sistema, mentre nei sistemi reali (come lo sono la quasi totalità delle attrezzature di lavoro) possono esistere due o più frequenze di risonanza.

Per quanto sin qui detto risulta chiaro come sia praticamente impossibile evitare che un sistema trasmetta vibrazioni, pertanto il problema dell'isolamento dalle vibrazioni

Figura 16 Effetto di una forza esterna su un sistema vibrante 'macchina semplice'



(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

indotte da un sistema vibrante va inquadrato nel tentativo di ridurre il più possibile l'intensità delle forze trasmesse dal sistema intervenendo, per quanto tecnicamente possibile, sui parametri che caratterizzano il sistema smorzante o, meglio, antivibrante (massa, molle e dissipatori).

La qualità dell'isolamento può essere valutata tramite il valore assunto dal parametro trasmissibilità (T) definito come il rapporto tra la forza trasmessa all'ambiente o all'utilizzatore $F(t)$ e la forza eccitatrice esterna $F(t)$.

Esaminati, quindi, i principi basilari di un sistema vibrante, si può ipotizzare che i metodi praticabili per la riduzione delle vibrazioni meccaniche possano essere fondamentalmente di due tipologie:

- 1) la riduzione delle vibrazioni alla sorgente (riducendo, quindi, la forza $F(t)$);
- 2) la variazione dei collegamenti e delle modalità di vincolo, mediante:
 - a. lo smorzamento delle vibrazioni (agendo sui dissipatori);
 - b. la sospensione elastica della sorgente (agendo sulle molle).

La riduzione delle vibrazioni alla sorgente non è però sempre realizzabile; è il caso, ad esempio, degli autoveicoli per i quali la sorgente principale di vibrazioni è costituita dalle condizioni stradali, sulle quali non si può quasi mai agire a priori.

In altri casi un'eccessiva riduzione delle vibrazioni generate da un'attrezzatura di lavoro potrebbe provocare un forte decremento dell'efficienza dell'attrezzatura stessa.

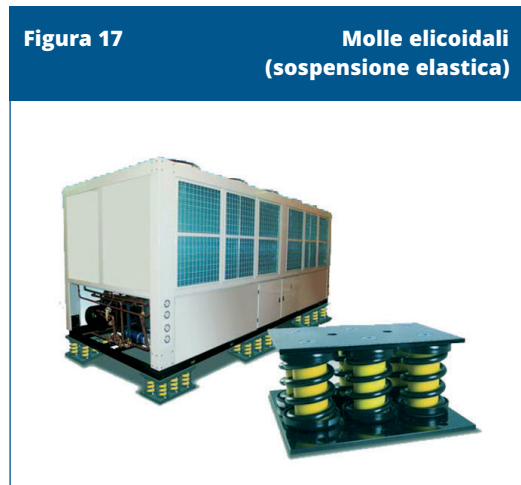
4.2 LA RIDUZIONE PASSIVA DELLE VIBRAZIONI MECCANICHE

Per quanto concerne lo smorzamento delle vibrazioni di tipo passivo, si distinguono elementi smorzanti (come gli ammortizzatori presenti nelle sospensioni dei veicoli) ed elementi antivibranti.

I dispositivi antivibranti più utilizzati sono costituiti da molle in acciaio, gomma e materiale plastico, sughero, feltro, fibre di vetro compatte, ecc.

Le molle metalliche (come quelle illustrate nella Figura 17) sono usate molto spesso come isolatori di vibrazioni in quanto, oltre ai vantaggi legati alla resistenza meccanica ed alla capacità di fornire grandi deflessioni statiche, cambiando la tipologia di materiale ed il loro dimensionamento, consentono di risolvere problemi di isolamento a qualsiasi frequenza.

Il materiale elastomerico, come ad esempio la gomma, si presta bene all'isolamento di



<http://www.pantecnica.it/>

macchinari nel caso sia necessario raggiungere un valore consistente di smorzamento c . I supporti antivibranti in gomma (Figura 18) si basano sul principio che l'energia prodotta dalla vibrazione può essere dissipata accoppiando l'elasticità del materiale alle caratteristiche di smorzamento di tipo isteretico, che dissipa una parte dell'energia accumulata sotto forma di calore.

Il rapporto tra l'ammortizzazione reale e la quantità di ammortizzazione richiesta per raggiungere lo smorzamento critico (punto in cui il sistema smette di oscillare) è detto fattore di smorzamento ξ . Valori tipici del fattore di smorzamento ξ di tali supporti sono dell'ordine del 5%.

Il sughero rappresenta uno dei primi materiali impiegati per l'isolamento dalle vibrazioni (Figura 19); gli isolatori di tale tipo lavorano prevalentemente a compressione. Tale materiale non è in grado di fornire grandi deflessioni statiche e quindi non è utile installarlo per impieghi in presenza di frequenza naturale di modesta entità ossia inferiori a 10 Hz. Valori tipici del fattore di smorzamento ξ sono dell'ordine del 6%.

Il feltro presenta forti caratteristiche di smorzamento che lo rende particolarmente adatto nel ridurre l'ampiezza delle vibrazioni quando si prevede che il sistema possa essere soggetto a vibrazioni prossime alla propria risonanza. Tale materiale presenta fattori di smorzamento ξ prossimi a quelli del sughero.

Normalmente è anche possibile isolare la macchina ancorandola ad una massa notevole. Infatti, vincolando in maniera rigida la macchina soggetta a vibrazioni ad una consistente massa inerziale, si ottiene un aumento della massa totale del sistema del quale si vogliono controllare le vibrazioni.

Al contrario, sovrapponendo la macchina alla struttura di basamento

Figura 18 Supporti anti-vibranti in gomma



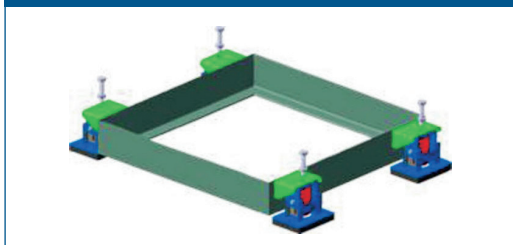
<http://www.plastigomma.it/>

Figura 19 Piastra antivibrante in gomma e sughero



<https://www.neysamarket.com>

Figura 20 Basamento per ospitare una macchina da isolare



<https://www.solecosrl.com/>

(Figura 20) ed interponendo idonei supporti antivibranti, si può ridurre la rigidità dell'accoppiamento rispetto al valore diretto.

Entrambi i percorsi riducono la frequenza di vibrazione.

Per un effettivo isolamento antivibrante è necessario che:

- gli isolatori siano installati simmetricamente rispetto al moto del baricentro;
- il centro di gravità risulti il più basso possibile al fine di evitare instabilità del sistema.

Le macchine caratterizzate da urti e vibrazioni di notevole entità (ad esempio grandi presse, rotative, magli, ecc.) richiedono, oltre all'impiego di sospensioni antivibranti, anche la realizzazione di particolari fondazioni (basamenti galleggianti) atte a ridurre la trasmissione delle sollecitazioni della macchina al pavimento, al fabbricato ed agli edifici circostanti.

Alcune aziende produttrici di attrezzature manuali hanno realizzato delle serie di prodotti con specifiche soluzioni per la riduzione delle vibrazioni, come ad esempio assorbitori meccanici/idraulici o impugnature ammortizzate e disaccoppiate dal diretto contatto con il motore (Figura 21).

Nel caso delle WBV, che riguardano normalmente autoveicoli o macchine operatrici e, in casi eccezionali, vibrazioni trasmesse attraverso le strutture, le azioni per la riduzione delle vibrazioni riguarderanno l'isolamento delle parti in movimento (motore, albero della trasmissione, ecc.), l'assorbimento attraverso sospensioni degli effetti provenienti dalla superficie stradale ed infine l'isolamento delle parti a contatto col soggetto (pedane e sedili).

Figura 21 Esempio di soluzione per la riduzione di vibrazioni (HAV)



(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

4.3 LA RIDUZIONE ATTIVA DELLE VIBRAZIONI MECCANICHE

Quanto riportato sin qui è stato un approccio di tipo 'passivo' a quella che è la problematica del controllo delle vibrazioni. In linea di principio, però, esistono anche metodi di controllo di tipo 'attivo' e di tipo 'semi-attivo' per ridurre le vibrazioni trasmesse verso l'ambiente e/o verso l'operatore.

Nel controllo 'passivo', il sistema, una volta progettato e realizzato in tutte le sue parti (compresa l'introduzione degli elementi smorzanti sopra riportati), mantiene le sue caratteristiche dinamiche indipendentemente dalle eccitazioni che verranno prodotte e quindi di non è in grado di poter rispondere in maniera ottimale a tutte quelle condizioni vibratorie non preventivate.

Il controllo 'attivo' è così chiamato perché le vibrazioni vengono attenuate grazie a

dispositivi in grado di immettere energia nel sistema. Tali dispositivi sono generalmente attuatori (oledinamici o elettrodinamici) che agiscono secondo il principio dell'*interferenza distruttiva*, per il quale, sommando segnali uguali, ma in controfase, si ottiene un segnale nullo (Figura 22).

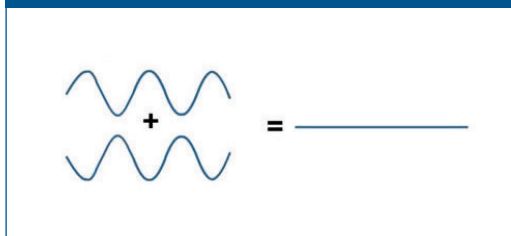
Con riferimento allo schema generale proposto nella Figura 16, gli attuatori vengono solitamente interposti tra la massa ed il basamento bypassando, o interponendosi, al sistema molla-dissipatore.

Il principale vantaggio del controllo attivo, rispetto a quello passivo, è la possibilità dello stesso di adattarsi a diverse tipologie di vibrazione in un più o meno ampio intervallo di frequenze e di intensità. Tra gli svantaggi, invece, c'è senz'altro la necessità della costante presenza di una fonte di energia esterna che alimenti gli attuatori, le difficoltà di messa a punto del sistema di controllo ed il costo piuttosto elevato.

Lo sviluppo di dispositivi a controllo attivo è ad oggi principalmente orientato allo smorzamento delle WBV, che, a differenza delle HAV, non sono quasi mai funzionali alle lavorazioni (basti pensare all'esposizione indebita che hanno gli autisti di qualsiasi veicolo). A tal riguardo nella Figura 23 è riportato il prototipo del sedile a controllo attivo ad un grado di libertà progettato e realizzato dal Laboratorio Rischio agenti fisici del Centro ricerche 'Monte Porzio Catone' dell'Inail.

A metà strada tra il controllo attivo e quello passivo si inseriscono i cosiddetti dispositivi 'semi-attivi' in grado di modificare in tempo reale le loro caratteristiche dinamiche con un dispendio di energia molto ridotta rispetto ai dispositivi attivi. Un interessantissimo esempio di controllo semi-attivo di vibrazioni è quello attuabile tramite l'utilizzo di dispositivi basati su fluidi magneto-reologici i quali, essendo composti da piccole particelle magneticamente polarizzabili disperse in olio, quando vengono sottoposte a campi magnetici, si orientano cambiando le proprietà elastiche compressive del dispositivo stesso.

Figura 22 Principio dell'interferenza distruttiva



(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

Figura 23 Prototipo di sedile a controllo attivo Inail



(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

5. LA CORRETTA MANUTENZIONE

L'usura dei componenti meccanici (cuscinetti a sfera, assi, catene, ecc.), così come anche il deterioramento dei dispositivi utilizzati per ridurre le vibrazioni, che perdono col tempo le loro caratteristiche, impongono al DL di effettuare una *manutenzione programmata* per le attrezzature e le macchine adoperate (sostituzione delle parti usurate, lubrificazione, ecc.) al fine di evitare l'amplificazione delle vibrazioni trasmesse al lavoratore. Non a caso l'art. 71 del d.lgs. 81/2008 prevede proprio che il DL metta a disposizione attrezzature idonee ai fini della sicurezza e della salute e adeguate al lavoro da svolgere. Le attrezzature di lavoro devono anche essere corredate, ove necessario, da apposite istruzioni d'uso e libretto di manutenzione.

Le condizioni di manutenzione sono, inoltre, elemento fondamentale da tenere in considerazione anche per quanto concerne la stima dell'esposizione delle vibrazioni (si veda la sezione 2.4). Le informazioni fornite dal costruttore sulle accelerazioni dei diversi utensili/veicoli possono essere utilizzate soltanto se l'attrezzatura risulta 'in buone condizioni di manutenzione'.

A seconda dei casi, si distinguono tre tipologie di manutenzione:

- la manutenzione a *guasto*: è la tipologia più antica e prevede l'effettuazione di interventi per riportare l'attrezzatura di lavoro nelle condizioni di buon funzionamento, ossia di progetto, avendo la medesima perso la capacità di svolgere la sua funzione, sia perché non è più in grado di produrre, sia perché lo fa con tempo ciclo più lungo del previsto o perché non rispetta più il livello di qualità assegnato;
- la manutenzione *preventiva*: si esplica attraverso la prevenzione del guasto mediante interventi atti a ritardarne l'accadimento; tali interventi, programmati, prescindono dalla valutazione della probabilità di guasto, calcolata nel momento dell'effettuazione; se, infatti, è prevista la sostituzione di un componente al raggiungimento di un prefissato numero di ore di funzionamento, essa sarà effettuata indipendentemente dal suo stato di degrado;
- la manutenzione *proattiva*: opera affinché possano essere minimizzate le condizioni che determinano l'insorgenza del guasto e non sia quindi necessario operare degli interventi di ripristino. Tale tipologia di manutenzione si basa, pertanto, sulla progettazione, in continuo feedback migliorativo, dell'attrezzatura di lavoro.

Si illustrano, a titolo puramente esemplificativo, alcuni interventi manutentivi finalizzati al ripristino dei valori di vibrazioni originali dichiarati dal costruttore della macchina.

Esempio 1: Motoseghe

Gruppo campana/pignone

È necessario sostituire la campana, che trasmette il moto alla catena, quando l'usura del pignone è tale da consentire salti e scavallamenti della catena.

Affilatura della catena

L'affilatura (Figura 24) può avvenire a mano libera (ad opera di personale esperto), oppure con l'utilizzo di apposite mole/lime da fissare alla barra.

Occorre porre attenzione affinché fra il tagliente e il regolatore di profondità vi sia una distanza nell'ordine di qualche decimo di mm.

Corpi ammortizzanti

Sono elementi costituiti da molle o da supporti, in ferro o gomma, posizionati in alcuni punti, ad esempio, tra il motore e la struttura della macchina.

Dopo un uso ripetuto nel tempo possono perdere le loro caratteristiche elastiche.

Barra porta catena

È l'elemento di supporto della catena che scorre all'interno dell'apposita gola (Figura 25); può essere munito di rocchetto di rinvio sulla punta.

Può essere soggetto ad usura anche solo il bordo inferiore.

Figura 24 Esempio di affilatura della catena



<https://www.husqvarna.com>

Figura 25 Esempio di barra porta catena



<https://www.manomano.it>

Testa rotante

È l'elemento su cui si montano gli organi lavoratori quali lame, filo, ecc. (Figura 26). L'utensile ruota con elevata velocità e anche il più piccolo squilibrio provoca delle vibrazioni; per tale motivo è opportuno che non vi sia differenza di distribuzione dei pesi e/o disassamenti. È inoltre importante che la lunghezza dei fili sia identica.

Figura 26

Esempio di testa rotante



<http://www.motogarden.net>

Corpi ammortizzanti

Sono elementi in metallo/gomma posti fra il gruppo motore e il telaio di supporto (Figura 27). Sono soggetti ad invecchiamento.

Figura 27

Esempio di elementi ammortizzanti in un decespugliatore



<https://www.oleomac.it>

Flessibile

Nei decespugliatori portati a spalla è la parte dell'albero di trasmissione flessibile o frusta (Figura 28). Questa parte, se non ben ingrassata e lubrificata, può generare vibrazioni dovute allo sfregamento dell'elemento interno con la veste esterna.

Figura 28

Esempio di albero di trasmissione flessibile di un decespugliatore a spalla



<https://www.bricoutensili.com>

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Commissione europea, Direzione generale per l'Occupazione, gli affari sociali e le pari opportunità, Unità F.4 - Guida non vincolante alla buona prassi nell'attuazione della direttiva 2002/44/CE (Vibrazioni sul lavoro) - agosto 2007.

Coordinamento tecnico per la Sicurezza nei Luoghi di Lavoro delle Regioni e delle Province Autonome - Decreto Legislativo 81/2008, Titolo VIII, Capo I, II, III, IV e V sulla prevenzione e protezione dai rischi dovuti all'esposizione ad agenti fisici nei luoghi di lavoro - Indicazioni operative - Rev. 03 approvata il 13/02/2014.

Research Network on Detection and Prevention of Injuries due to Occupational Vibration Exposures (Vibration Injury Network, VINET). Final Report to the European Commission. Appendices H1A and W1A. EC BIOMED 2 concerted action - project no. BMH4-CT98-3251, April 1998 to March 2001.

Tyler R., Darlington P., Measurement uncertainty in human exposure to vibration - Report on the National Measurement System Directorate (NMSD) project 2.3.1, 2004.

Inail. Malprof. URL: <https://www.inail.it/cs/internet/attivita/ricerca-e-tecnologia/area-salute-sul-lavoro/sistemi-di-sorveglianza-e-supporto-al-servizio-sanitario-nazionale/malprof.html> [consultato a marzo 2019].

Inail. Banca dati statistica. URL: <https://bancadaticsa.inail.it> [consultato a marzo 2019].

Portale agenti fisici. URL: <https://www.portaleagentifisici.it> [consultato a marzo 2019].

RIFERIMENTI NORMATIVI

[Decreto del Presidente della Repubblica 24 luglio 1996, n. 459](#)

Regolamento per l'attuazione delle direttive 89/392/CEE, 91/368/CEE, 93/44/CEE e 93/68/CEE concernenti il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative alle macchine. (Gazzetta Ufficiale n.209 del 06/09/1996 - Suppl. Ordinario n. 146).

[Decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81](#)

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) (Decreto integrativo e correttivo: Gazzetta Ufficiale n. 180 del 05 agosto 2009 - Suppl. Ordinario n. 142/L).

[Decreto legislativo 27 gennaio 2010, n. 17](#)

Attuazione della direttiva 2006/42/CE, relativa alle macchine e che modifica la direttiva 95/16/CE relativa agli ascensori. (Gazzetta Ufficiale n.41 del 19/02/2010 - Suppl. Ordinario n. 36/L).

[Decreto legislativo 19 febbraio 2019, n. 17](#)

Adeguamento della normativa nazionale alle disposizioni del regolamento (UE) n. 2016/425 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 9 marzo 2016, sui dispositivi di protezione individuale e che abroga la direttiva 89/686/CEE del Consiglio.

[Direttiva 78/764/CEE del Consiglio, del 25 luglio 1978](#)

Concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati Membri relative al sedile del conducente dei trattori agricoli o forestali a ruote. (Gazzetta Ufficiale n. L 255 del 18/09/1978 pag. 0001 - 0039).

[Direttiva 89/392/CEE del Consiglio, del 14 giugno 1989](#)

Concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati Membri relative alle macchine /* Versione codificata CF 398L0037 */ (Gazzetta Ufficiale n. L 183 del 29/06/1989 pag. 0009 - 0032).

[Direttiva 98/37/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 22 giugno 1998](#)

concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative alle macchine (Gazzetta Ufficiale n. L 207 del 23/07/1998 pag. 0001 - 0046).

[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) - Dichiarazione congiunta del Parlamento europeo e del Consiglio (Gazzetta Ufficiale n. L 177 del 06/07/2002 pag. 0013 - 0020).

[Direttiva 2003/37/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 26 maggio 2003](#)

Relativa all'omologazione dei trattori agricoli o forestali, dei loro rimorchi e delle loro macchine intercambiabili trainate, nonché dei sistemi, componenti ed entità tecniche di tali veicoli e abroga la direttiva 74/150/CEE (Testo rilevante ai fini del SEE.) (Gazzetta Ufficiale n. L 171 del 09/07/2003 pag. 0001 - 0080).

[Direttiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 17 maggio 2006](#)

Relativa alle macchine e che modifica la direttiva 95/16/CE (rifusione). (Gazzetta Ufficiale n. L 157/24 del 9/06/2006).

[Proposta della Commissione per una direttiva del Consiglio](#)

Sui requisiti minimi di salute e sicurezza riguardanti l'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti da agenti fisici (93/C77/02) (Gazzetta Ufficiale n. C 77 del 18/03/1993, pagg. 12-29).

[Proposta della Commissione per una direttiva del Consiglio](#)

Sui requisiti minimi di salute e sicurezza riguardanti l'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti da agenti fisici (94/C230/03) (Gazzetta Ufficiale n. C 230 del 19/08/1994, pag. 3-29).

[Regolamento \(UE\) n. 167/2013 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 5 febbraio 2013](#)

Relativo all'omologazione e alla vigilanza del mercato dei veicoli agricoli e forestali. (Testo rilevante ai fini del SEE). (Gazzetta Ufficiale n. L 60, 2.3.2013, p. 1-51).

[Regolamento delegato \(UE\) n. 1322/2014 della Commissione, del 19 settembre 2014](#)

Integra e modifica il regolamento (UE) n. 167/2013 del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto concerne la costruzione dei veicoli e i requisiti generali di omologazione dei veicoli agricoli e forestali. (Testo rilevante ai fini del SEE). (Gazzetta Ufficiale n. L 364, 18.12.2014, p. 1-315).

[Regolamento \(UE\) 2016/425 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 9 marzo 2016](#)

Dispositivi di protezione individuale e che abroga la direttiva 89/686/CEE del Consiglio. (Testo rilevante ai fini del SEE) (Gazzetta Ufficiale n. L 81, 31.3.2016, p. 51-98).

NORME TECNICHE

UNI EN 1032:2009 Vibrazioni meccaniche - Esame di macchine mobili allo scopo di determinare i valori di emissione vibratoria

UNI ISO 2631-1:2014 Vibrazioni meccaniche e urti - Valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse al corpo intero - Parte 1: Requisiti generali.

ISO 2631-2:2003 Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz).

ISO 2631-5:2018 Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Method for evaluation of vibration containing multiple shocks.

UNI ISO 5348:2007 Vibrazioni meccaniche e urti - Montaggio meccanico degli accelerometri.

UNI EN ISO 5349-1:2004 Vibrazioni meccaniche - Misurazione e valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse alla mano - Parte 1: Requisiti generali.

UNI EN ISO 5349-2:2015 Vibrazioni meccaniche - Misurazione e valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse alla mano - Parte 2: Guida pratica per la misurazione al posto di lavoro.

UNI EN ISO 8041-1:2017 Risposta degli esseri umani alle vibrazioni - Strumenti di misurazione - Parte 1: Strumenti per la misura di vibrazioni per uso generale.

UNI EN ISO 9612:2011 Acustica - Determinazione dell'esposizione al rumore negli ambienti di lavoro - Metodo tecnico progettuale.

UNI 9614:2017 Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo.

UNI EN ISO 10819:2013 Vibrazioni meccaniche e urti - HAV - Metodo per la misurazione e la valutazione della trasmissibilità delle vibrazioni dai guanti al palmo della mano.

UNI EN ISO 10326-1:2016 Vibrazioni meccaniche - Metodo di laboratorio per la valutazione delle vibrazioni sui sedili dei veicoli - Parte 1: Requisiti di base.

UNI/TR 11232-2:2007 Vibrazioni mano-braccio - Linee guida per la riduzione del rischio

da vibrazioni - Parte 2: Misure di prevenzione sul posto di lavoro (ritirata ma valida come norma di buona tecnica).

UNI/TS 11326-2:2015 Acustica - Valutazione dell'incertezza nelle misurazioni e nei calcoli di acustica - Parte 2: Confronto con valori limite di specifica.

UNI 11568:2015 Strumentazione e analisi per la misura delle vibrazioni - Strumentazione di misura.

UNI EN 12096:1999 Vibrazioni meccaniche - Dichiarazione e verifica dei valori di emissione vibratoria.

UNI CEN/TR 15172:2008 WBV - Linee guida per la riduzione del rischio da vibrazione - Parte 2: Misure di prevenzione sul posto di lavoro.

UNI CEN/TR 15350:2013 Vibrazioni meccaniche - Linee guida per la valutazione dell'esposizione al sistema mano-braccio partendo dalle informazioni disponibili, comprese quelle fornite dal fabbricante della macchina.

UNI ISO/TR 18570:2018 Vibrazioni meccaniche - Misurazione e valutazione dell'esposizione umana alla vibrazione trasmessa al sistema mano-braccio - Metodo supplementare per valutare il rischio di lesione vascolare.

UNI EN ISO 20643:2012 Vibrazioni meccaniche - Macchine portatili e condotte a mano - Principi per la valutazione della emissione di vibrazioni.

DIN 45660-2:2018 Guide for dealing with uncertainty in acoustics and vibration - Part 2: Uncertainty of vibration quantities.

UNI CEI 70098-3:2016 Incertezza di misura - Parte 3: Guida all'espressione dell'incertezza di misura.

ACRONIMI

APPENDICI

APPENDICE A - METODO DELLA QUARTA POTENZA DELLA DOSE DI VIBRAZIONI

Come precedentemente indicato al punto 2.6.10, la dose delle vibrazioni alla quarta potenza (VDV), è così definita:

$$VDV(T_e) = \sqrt[4]{\int_0^{T_e} a_w(t)^4 dt} \quad \text{m/s}^{1,75}$$

dove:

- $a_w(t)$ è l'accelerazione istantanea al tempo t , ponderata in frequenza;
- T_e è la durata del periodo totale di esposizione.

Se il tempo di misura T_{mis} , è inferiore al tempo di esposizione T_e , il valore di VDV descrittivo dell'esposizione si ottiene moltiplicando il risultato della misura per la quantità $(T_e/T_{mis})^{1/4}$, ovvero:

$$VDV(T_e) = VDV(T_{mis}) \sqrt[4]{\frac{T_e}{T_{mis}}} \quad \text{m/s}^{1,75}$$

Analogamente a quanto avviene per il descrittore della esposizione a vibrazioni nel metodo base A(8), anche il VDV va misurato indipendentemente su ciascuno degli assi della terna cartesiana mostrata nella Figura 9.

Nel caso generale in cui l'esposizione a vibrazioni consista di M periodi caratterizzati da vibrazioni diverse, il valore complessivo di VDV relativo al generico asse l viene calcolato a partire dai rispettivi valori parziali VDV_{lj} , ciascuno relativo ad uno degli M periodi:

$$VDV_l = \sqrt[4]{\sum_{j=1}^M (VDV_{lj})^4} \quad \text{m/s}^{1,75}$$

Il caso particolare in cui nella giornata lavorativa esista una sola esposizione significativa si deduce dal caso generale semplicemente ponendo $M = 1$.

Poiché la norma UNI ISO 2631-1 non fornisce nessuna indicazione riguardo all'utilizzo dei dati di VDV misurati sui diversi assi, si agisce in coerenza con quanto indicato al punto 1 dell'appendice B della direttiva 2002/44/CE. Il valore di VDV da utilizzare per la valutazione del rischio viene di conseguenza calcolato come il più alto dei tre valori

ottenuti moltiplicando ciascuno dei valori assiali di VDV per il relativo peso assiale k_x , k_y , k_z . Come già discusso al punto 2.6.1, sia per soggetti in posizione seduta che per soggetti in posizione eretta, si assumono i seguenti valori

- asse x: $k_x = 1,4$;
- asse y: $k_y = 1,4$;
- asse z: $k_z = 1$.

Pertanto si ha:

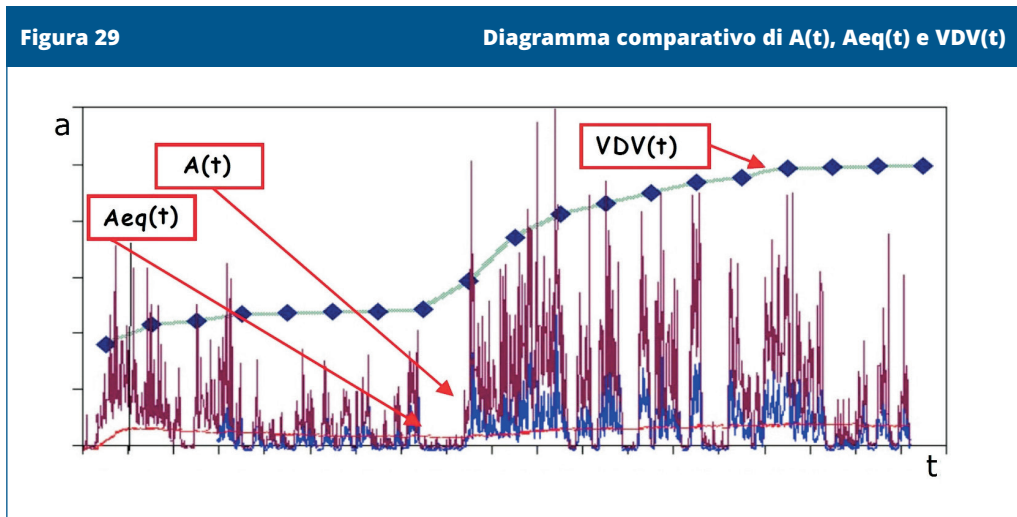
$$\text{VDV} = \max (1,4 \text{ VDV}_x; 1,4 \text{ VDV}_y; \text{VDV}_z) \text{ m/s}^{1,75}$$

Rispetto al metodo r.m.s., il metodo VDV è in grado di valutare più appropriatamente l'esposizione totale cui il lavoratore è esposto, ben soppesando i picchi e/o i cambi improvvisi di accelerazione e laddove si sia in presenza di forti componenti impulsive (es.: vibrazioni indotte da automezzi senza adeguata ammortizzazione della postazione di guida, dalle condizioni non ottimali della superficie stradale, in presenza di velocità di guida elevate, ecc.).

Le principali differenze tra i descrittori del metodo base A(8) e del metodo della dose della quarta potenza (VDV), possono essere riassunte nella Tabella 12:

Tabella 12 Differenze fra metodo base e metodo della quarta potenza della dose	
A(8)	VDV
Fornisce un valore medio e quindi deve essere normalizzato ad 8 ore giornaliere	Fornisce un valore cumulativo e quindi deve essere riferito al tempo di effettiva esposizione giornaliera
Non è sensibile agli urti, impulsivi e transitori	È sensibile agli urti, impulsivi e transitori
Ha un significato intuitivo	Non ha un significato intuitivo
Non è stata evidenziata alcuna correlazione dose-effetto	Non è stata sperimentata una correlazione dose-effetto
È deducibile dai dati del fabbricante (direttiva macchine)	Non è disponibile dai dati del fabbricante e deve essere misurato per avere un valore rappresentativo
Esistono molti strumenti di misura	Esistono pochi strumenti di misura
È presente nella direttiva 2002/44/CE e recepito nel d.lgs. 81/08	È presente nella direttiva 2002/44/CE ma non recepito nel d.lgs. 81/08
È utilizzato dalla quasi totalità dei Paesi europei	È utilizzato solo nel Regno Unito

La Figura 29 riporta, a titolo di esempio, l'andamento nel tempo dell'accelerazione istantanea $a(t)$, dell'accelerazione r.m.s. (qui indicata come $A_{eq}(t)$, sulla base dell'equivalenza concettuale con L_{eq} nel rumore) e della dose di vibrazioni $VDV(t)$, relativamente alle vibrazioni trasmesse al corpo intero alla guida di una autovettura. Dal diagramma si evince come, al contrario di $A_{eq}(t)$, $VDV(t)$ sia una quantità di tipo cumulativo. $VDV(t)$, inoltre, risponde in modo più vistoso agli shock e agli urti, rispetto a $A_{eq}(t)$, che, invece, ben rappresenta i livelli di vibrazione stazionari.



Inail - P. De Santis, R. Nitti, G. Rosci, A. Baldacconi; Il rischio da WBV - marzo 2004

Per quanto riguarda i valori soglia del VDV, la direttiva 2002/44/CE stabilisce:

- un valore d'azione per l'esposizione giornaliera, fissato a $9,1 \text{ m/s}^{1,75}$
- un valore limite per l'esposizione giornaliera, fissato a $21 \text{ m/s}^{1,75}$

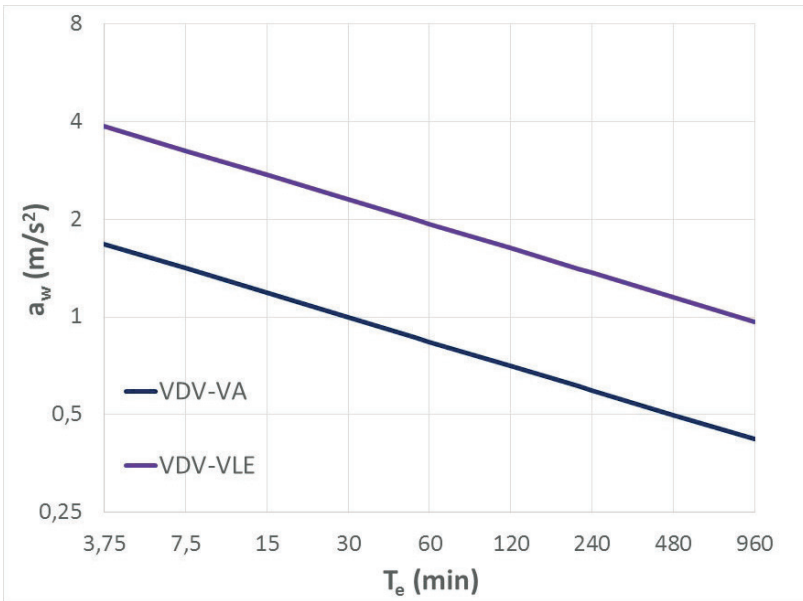
La Figura 30 mostra, nel piano $\log(a_w) - \log(T_e)$, le soglie per il metodo della quarta potenza della dose di vibrazioni. Qui a_w è l'accelerazione ponderata in frequenza e T_e è la durata del periodo di esposizione. Le soglie sono definite a partire dai limiti citati nella direttiva 2002/CE/44, mediante le due espressioni:

$$a_w(1,4^4\sqrt{T_e}) = 9,1 \text{ m/s}^{1,75} \quad \text{curva inferiore (valore di azione)}$$

$$a_w(1,4^4\sqrt{T_e}) = 21 \text{ m/s}^{1,75} \quad \text{curva superiore (valore limite di esposizione)}$$

La zona compresa fra le rette corrispondenti ai valori di azione e ai valori limite di esposizione è detta 'area di cautela'.

Figura 30

Diagramma comparativo di $A(t)$, $A_{eq}(t)$ e $VDV(t)$ 

(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

APPENDICE B - METODO DEI VALORI R.M.S. COSTANTI

Come precedentemente illustrato al punto 2.6.10, il metodo dei valori r.m.s. costanti si basa sulla misura delle accelerazioni (ponderate in frequenza) integrate e mediate su periodi molto brevi:

$$a_w(t_0) = \sqrt{\left[\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} a_w^2(t) dt \right]} \quad \text{m/s}^2$$

dove:

- t è il tempo (variabile di integrazione);
- $a_w(t)$ è l'accelerazione istantanea ponderata in frequenza;
- τ è il tempo di integrazione per la definizione della media; la norma UNI ISO 2631-1:2014 raccomanda $\tau = 1$ secondo, corrispondente alla costante del tempo di integrazione *slow* nell'acustica;
- t_0 è l'istante al quale si esegue il calcolo ed al quale viene associato il valore di accelerazione ottenuto.

La vibrazione viene caratterizzata mediante una quantità detta MTVV, pari al valore massimo di $a_w(t_0)$ su tutto il periodo di esposizione.

$$\text{MTVV} = \max [a_w(t_0)]$$

Mediante l'uso di una costante di integrazione molto breve, questo metodo riesce a tener conto di urti occasionali e di vibrazioni transienti.

Nessun valore di azione o valore limite su MTVV risulta indicato nella normativa tecnica.

APPENDICE C - COMFORT

C.1 GENERALITÀ

Al contrario di quanto avviene per altri agenti fisici quali rumore e microclima, il disturbo (o *discomfort*) indotto dalla esposizione professionale a vibrazioni è tutto sommato un problema di importanza marginale. In questa appendice verranno forniti alcuni elementi utili a chi desideri approfondire questo argomento, fermo restando che la valutazione del discomfort associato ad una esposizione professionale a vibrazioni non fa parte del processo descritto nel Titolo VIII Capo III del d.lgs. 81/2008, il cui scopo è quello di prevenire gli effetti patologici delle vibrazioni.

La distinzione principale che è opportuno fare è quella fra disturbo indotto da vibrazioni connesse alla propria attività lavorativa (nel seguito indicato come *diretto*) e disturbo indotto da vibrazioni non connesse alla propria attività lavorativa (nel seguito indicato come *indiretto*).

C.2 HAV

Per quanto riguarda le HAV, è possibile affermare che il discomfort generato da una esposizione professionale a HAV, sia di tipo diretto che di tipo indiretto, è un evento assai raro per non dire assente.

C.3 WBV

Relativamente alle WBV, entrambe le tipologie di discomfort appaiono invece possibili.

C.3.1 Discomfort diretto

Il discomfort diretto può fondatamente applicarsi a tutti quei lavoratori che guidano mezzi di trasporto su percorsi stradali, ovvero taxisti e guidatori di autobus urbani ed extraurbani. Essi solitamente risultano esposti a vibrazioni decisamente inferiori al valore di azione di $A(8) = 0,5 \text{ m/s}^2$ indicato dal Capo III del Titolo VIII del d.lgs. 81/2008. Tuttavia, nel loro caso le vibrazioni possono interferire con l'attività lavorativa ed avere effetti indiretti anche gravi, se compromettono ad esempio il compito visivo o la destrezza manuale. Tali effetti vanno presi in esame nell'ambito più generale della valutazione del rischio, come indicato nell'art. 28 e 181 del d.lgs. 81/2008.

Indicazioni utili alla quantificazione del discomfort diretto indotto dalle WBV sono con-

tenute nella sezione 8 della norma UNI ISO 2631-1:2014. In prima approssimazione essa può essere eseguita mediante la quantità

$$a_{v1} = \sqrt{[(k_{xp} a_{wxp})^2 + (k_{yp} a_{wyp})^2 + (k_{zp} a_{wzp})^2]} \text{ m/s}^2$$

dove:

- a_{wxp} , a_{wyp} , a_{wzp} sono le accelerazioni r.m.s. ponderate in frequenza, relative agli assi x, y, z, misurate sul piano del sedile (come indicato dal pedice "p"). Come già chiarito al punto 2.6.1, la ponderazione per le accelerazioni sugli assi x e y segue la curva W_d , mentre la ponderazione per l'accelerazione sull'asse z segue la curva W_k (Figura 10);
- k_{xp} , k_{yp} , k_{zp} sono i fattori di peso assiali, in questo caso posti tutti pari ad 1 (UNI ISO 2631-1, punto 8.2.2.1).

Di fatto si tratta della stessa quantità utilizzata per la valutazione del rischio vibrazioni nel caso in cui non esista un asse dominante, con l'unica differenza rappresentata dal valore numerico dei fattori di peso assiali sugli assi x e y.

La stessa norma UNI ISO 2631-1:2014 suggerisce inoltre che 'in alcuni ambienti' altri punti di immissione della vibrazione oltre ai glutei possono essere rilevanti. In particolare la nota 4 al punto 8.2.3 indica che la vibrazione dello schienale nel piano orizzontale (assi x e y) è potenzialmente rilevante ai fini del discomfort. Di tale vibrazione è possibile tener conto in due modi:

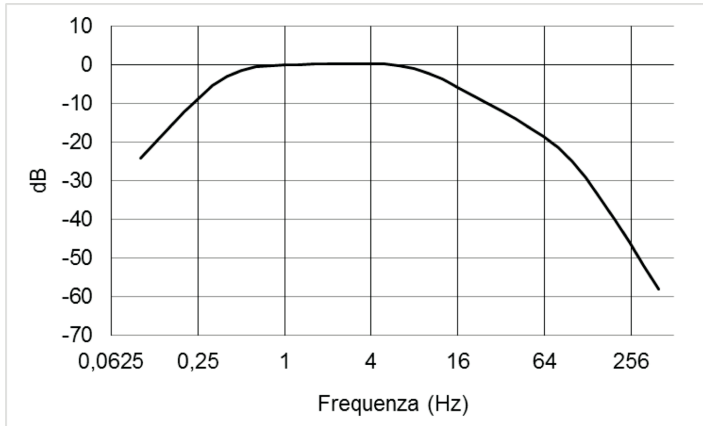
- a) con maggior accuratezza eseguendo una misura non solo sul piano del sedile ma anche sullo schienale del sedile e calcolando quindi la quantità:

$$a_{v2} = \sqrt{[(k_{xp} a_{wxp})^2 + (k_{yp} a_{wyp})^2 + (k_{zp} a_{wzp})^2 + (k_{xs} a_{wxs})^2 + (k_{ys} a_{wys})^2]} \text{ m/s}^2$$

dove, in aggiunta alle quantità già definite in precedenza:

- a_{wxs} , a_{wys} sono le accelerazioni r.m.s. ponderate in frequenza, relative agli assi x, y, misurate sullo schienale del sedile (come indicato dal pedice 's'). La ponderazione per l'accelerazione sull'asse y segue di nuovo la curva W_d , mentre la ponderazione per l'accelerazione sull'asse x segue la curva W_c , qui mostrata nella Figura 31;
- $k_{xs} = 0,8$ e $k_{ys} = 0,5$ sono i pertinenti fattori di peso assiali (UNI ISO 2631-1, punto 8.2.2.1)

Figura 31

Curva di ponderazione W_k 

(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

L'adeguatezza del valore totale di vibrazioni *complessivo* (ovvero la quantità a_{v2}) per la quantificazione del discomfort è stabilita dalla UNI ISO 2631-1 al punto 8.2.3 nel caso di simultanea rilevanza della vibrazione prodotta in più punti di immissione;

- b) con minor accuratezza utilizzando la quantità a_{v1} vista sopra, ma con fattori peso assiali k_{xp} e k_{yp} , entrambi posti pari a 1,4 ovvero, come nel caso della valutazione del rischio vibrazioni, mediante il valore totale di vibrazioni.

Non esistono indicazioni normative riguardo alla dipendenza del discomfort dal profilo temporale della vibrazione e quindi alle modalità con cui eventualmente elaborare serie di valori di a_{v1} o a_{v2} ottenute nel corso della giornata, per il calcolo di un descrittore di discomfort.

Si raccomanda di stimare il descrittore della vibrazione ai fini della valutazione del discomfort con le stesse modalità con le quali si ottiene il descrittore dell'esposizione su periodi brevi.

Né il d.lgs. 81/2008 né la normativa tecnica contengono valori limite di accettabilità per il discomfort. Tuttavia la norma UNI ISO 2631-1 riporta nell'Appendice C una relazione tra il livello di discomfort e il descrittore della vibrazione (valore totale di vibrazione a_{v1} o a_{v2} come definiti in precedenza). Tale relazione è riassunta nella Tabella 13.

Tabella 13 Relazione tra vibrazione e sensazione degli esposti	
Valore totale di vibrazione (m/s^2)	Livello di discomfort
< 0,315	nessun disagio
da 0,315 a 0,63	lieve disagio
da 0,5 a 1	disagio percepibile
> 0,8	disagio

C.3.2 Discomfort indiretto

Il discomfort indiretto può applicarsi a tutti quei soggetti che esplicano la loro attività lavorativa all'interno di edifici in presenza di una significativa sorgente esterna di vibrazioni, ad esempio gli addetti di amministrazione di un'azienda tessile il cui ufficio si trovi adiacente all'area telai, ovvero in diretta prossimità di una infrastruttura stradale/ferroviaria.

Relativamente alla quantificazione del discomfort, è possibile utilizzare anche in questo caso la quantità a_{v1} , con i fattori peso assiali pari ad 1, come nel caso del disturbo diretto. La vibrazione trasmessa dallo schienale è, in questo contesto, irrilevante.

A differenza del caso diretto, è però possibile in questo caso indiretto avere informazioni affidabili sia sull'estrazione di un descrittore di discomfort dalle diverse misure di a_{v1} , sia sui valori soglia applicabili. Entrambi questi temi sono trattati nella norma UNI 9614:2017, che contiene una dettagliata descrizione dei metodi con i quali calcolare il descrittore di discomfort in funzione della tipologia di sorgente disturbante, ed i limiti di accettabilità.

In estrema sintesi, il procedimento illustrato nella UNI 9614 è il seguente:

- si eseguono, o si estraggono da un'unica misura di lunga durata, misure di breve durata relative a singoli eventi. Il metodo di estrazione dipende dalla tipologia di sorgente vibratoria;
- si caratterizza la vibrazione di ciascuno di questi eventi mediante il relativo MTVV (ovvero il massimo pesato *slow* dell'acustica) triassiale, con ponderazione in frequenza W_m definita nello standard ISO 2631-2, e pesatura assiale 1 su tutti gli assi;
- si stima un estremo superiore 'statistico' della serie dei valori di MTVV ottenuti come al punto precedente;
- si sottrae a questo valore un valore descrittivo del background;
- il risultato viene confrontato con dei valori limite di accettabilità che sono differenziati per tipologia di soggetto interessato. Ai soggetti professionalmente esposti si applica un limite di 14 mm/s^2 che è più alto, come è facilmente immaginabile, rispetto a quelli che si applicano per la cittadinanza.

APPENDICE D - MALE DEI TRASPORTI

D.1 GENERALITÀ

L'esposizione del corpo intero a movimenti oscillatori a frequenze comprese tra 0,1 Hz e 0,5 Hz è comunemente considerata critica per l'incidenza del male dei trasporti (anche noto come 'mal di moto' o, più propriamente, cinetosi). Come già detto nell'Appendice C in tema di comfort, anche gli effetti riconducibili al male dei trasporti vanno esaminati all'interno della più generale valutazione dei rischi lavorativi (ex artt. 28 e 181 del d.lgs. 81/2008).

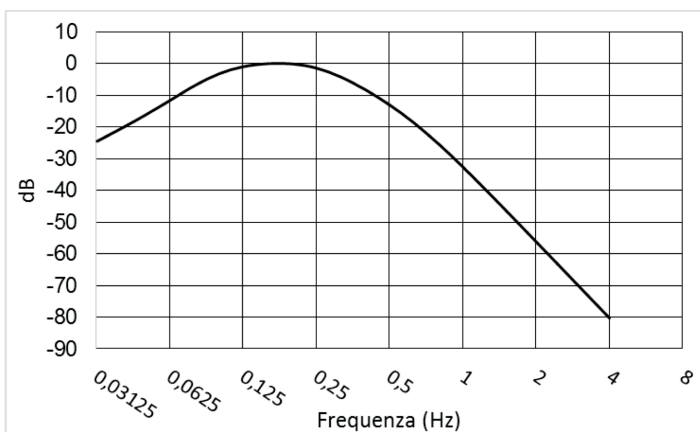
Dal punto di vista tecnico una guida a tal riguardo è riportata all'interno della norma UNI ISO 2631-1:2014, con particolare riferimento al settore marittimo.

D.2 VALUTAZIONE

Il punto 9.2 e l'Appendice D della norma UNI ISO 2631-1 suggeriscono una metodica per la valutazione del 'mal di moto' per le sole persone in postura eretta o seduta. In particolare le vibrazioni devono essere valutate soltanto in relazione all'accelerazione ponderata totale sull'asse z. Per il male dei trasporti la ponderazione in frequenza si ottiene utilizzando la curva denominata W_f il cui andamento è mostrato nella Figura 32.

Figura 32

Curva di ponderazione W_f



(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

Nonostante la probabilità che si riscontrino i sintomi del male dei trasporti aumenti all'aumentare della durata dell'esposizione alle oscillazioni, dopo un certo periodo (alcuni giorni) subentra spesso un meccanismo di adattamento al movimento oscillatorio che va poi a contrastare l'insorgenza della cinetosi. La norma ISO 2631-1 definisce un valore di dose di male dei trasporti in modo tale che i valori maggiori corrispondano a una maggiore incidenza di cinetosi tenuto conto anche dei fenomeni di adattamento di cui sopra.

Tale valore di dose del male dei trasporti, indicato con $MSDV_z$ (acronimo dall'inglese *motion sickness dose value*), è definito come:

$$MSDV_z = \left\{ \int_0^{T_e} [a_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{m/s}^{1,5}$$

dove $a_w(t)$ è il valore dell'accelerazione misurata sull'asse z ponderata in frequenza (W_i) e T_e è il tempo totale dell'esposizione (in secondi). Sulla falsariga di quanto indicato al punto 2.6.4 per la durata della misura nel contesto della valutazione dell'esposizione a WBV, si raccomanda in questo caso una durata della misura non inferiore a 10 minuti. Se l'esposizione al movimento oscillatorio è continua e di intensità quasi costante, il valore della dose del male dei trasporti può essere stimato come:

$$MSDV_z = a_w T_e^{1/2} \quad \text{m/s}^{1,5}$$

In quest'approssimazione la norma raccomanda che la misura abbia una durata di almeno 240 secondi.

D.3 LIMITE DI ACCETTABILITÀ

Sulla base delle indicazioni fornite al punto D.2 della UNI ISO 2631-1, assumendo un valore limite di accettabilità della frazione di soggetti esposti disturbati pari al 10%, si determina un valore limite di accettabilità della dose:

$$MSDV_z = 30 \text{ m/s}^{1,5}$$

A titolo di esempio, il valore limite di accettabilità $MSDV_z = 30 \text{ m/s}^{1,5}$ corrisponde ad un'esposizione ad un'accelerazione ponderata $a_w = 0,5 \text{ m/s}^2$ per una durata di un'ora, ovvero ad un'esposizione ad un'accelerazione ponderata $a_w = 1 \text{ m/s}^2$ per una durata di 15 minuti.

APPENDICE E - PAF

E.1 GENERALITÀ

Il PAF (portale agenti fisici) è uno strumento realizzato e gestito dal Laboratorio di sanità pubblica dell'Azienda Usl Toscana Sud Est insieme con il Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale (laboratori Rischio agenti fisici, Ergonomia e fisiologia, Rischio agenti cancerogeni e mutageni e Sezione tecnico scientifica supporto tecnico al SSN in materia di radiazioni) dell'Inail e con la collaborazione dell'Azienda Usl di Modena. Come riportato sulla home page del sito (Figura 33) il fine del PAF è quello di mettere a disposizione uno strumento informativo che orienti gli attori aziendali della sicurezza e gli operatori della prevenzione ad una risposta corretta ai fini della prevenzione e protezione da agenti fisici.

Figura 33

Home Page del Portale Agenti Fisici

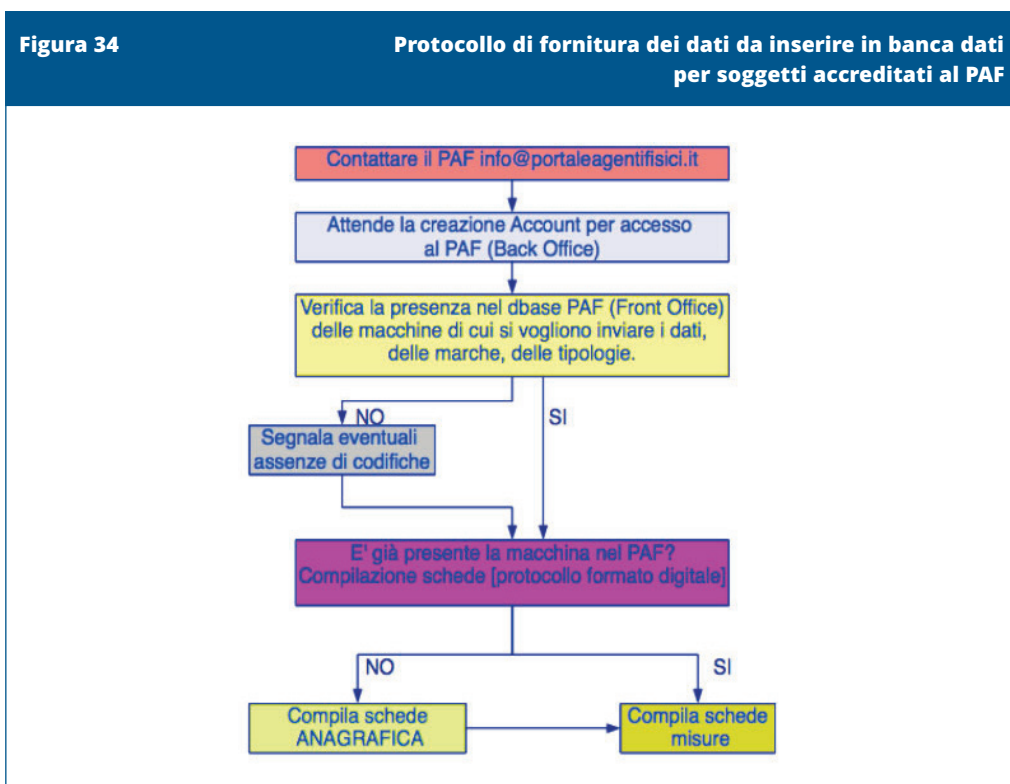


<https://www.portaleagentifisici.it/> (screenshots)

Per ciascuno dei rischi fisici è presente, oltre alla descrizione del rischio, la raccolta della normativa, le indicazioni per la valutazione del rischio, le indicazioni per il calcolo dell'esposizione, le relative banche dati, procedure semplificate online (descritte in seguito), le principali misure di prevenzione e protezione e, infine, una raccolta di documenti di approfondimento.

Nel PAF è presente, inoltre, una sezione chiamata 'Normativa e Linee Guida' in cui si trovano le norme e le linee guida di carattere generale inerenti gli agenti fisici. In tale sezione, ad esempio, è possibile consultare, la direttiva macchine, le linee guida e le indicazioni operative del Coordinamento tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro delle Regioni e delle Province autonome.

Nella sezione 'Documentazione per la fornitura dati', i soggetti che desiderano fornire dati al PAF possono farlo accreditandosi preliminarmente, facendone richiesta al comitato scientifico secondo lo schema riportato nella Figura 34.



<https://www.portaleagentifisici.it/> (screenshots)

Nel PAF è presente, inoltre, una sezione 'Newsletter' che permette agli iscritti di ricevere notifiche, ad esempio, sulla pubblicazione e/o modifica di documenti inerenti la valutazione del rischio o sulla pubblicazione di dati significativi inerenti l'esposizione o la riduzione dei rischi.

Sicuramente uno dei più importanti aspetti del PAF è quello di ospitare la BDV alla quale è possibile fare ricorso, ai sensi del d.lgs. 81/2008, art. 202, per ottenere una stima dell'accelerazione alla quale risulta esposto un lavoratore e per redigere, quindi, la valutazione del rischio da vibrazioni (si veda tal proposito quanto illustrato nella sezione 2.4). La BDV del PAF viene aggiornata continuamente, man mano che sono disponibili nuove misure sul campo o nuovi dati di certificazione di utensili/macchine ed è consultabile separatamente per vibrazioni trasmesse sia al sistema mano-braccio sia al corpo intero. Il contenuto principale della BDV del PAF è rappresentato dai dati misurati in campo. Il valore riportato nella BDV rappresenta il valor medio di almeno tre misure ripetute sullo stesso utensile/veicolo nella condizione operativa indicata nella scheda. Fermo restando che le stime di rischio effettuate mediante misurazione in campo vanno effettuate da personale qualificato e con attrezzature e metodologie adeguate, si segnala che queste rappresentano generalmente una stima più precisa dell'effettiva esposizione del lavoratore. Accanto ai dati ottenuti mediante misure in campo, la BDV del PAF riporta anche i dati forniti dal costruttore dell'attrezzatura, che rappresentano l'elemento cardine del percorso alternativo per la stima dell'esposizione a vibrazioni (si veda la sezione 2.4). Come illustrato nelle Figure 35 e 36, la consultazione della BDV del PAF è dotata di un apposito filtro di ricerca (uno per le HAV ed uno per le WBV) che consente all'utente di filtrare i dati relativi a ciascuna tipologia di macchinario in funzione di diversi parametri (come ad esempio il valore di emissione dichiarato o misurato) e di ordinarli in funzione del valore dei parametri stessi. Una volta identificato l'utensile (HAV) o il veicolo (WBV) che si vuole visualizzare si può accedere alla cosiddetta 'Scheda macchinario'.

Figura 35 **Filtro di ricerca nella BDV del PAF (mano-braccio)**

Marca

Modello

Tipologia

Sega a catena (motosega) (172)

Alimentazione

Valore misurato minore di m/s²

Valore dichiarato minore di m/s²

peso minore di kg

potenza minore di kW

ORDINA PER VALORE Misurato Dichiarato Peso Potenza

<https://www.portaleagentifisici.it/> (screenshots)

Figura 36

Filtro di ricerca nella BDV del PAF (corpo intero)

Marca

Modello

Tipologia
Trattore gommato (113)

Alimentazione

Valore misurato minore di m/s²

Valore dichiarato minore di m/s²

ORDINA PER VALORE Misurato Dichiarato

<https://www.portaleagentifisici.it/> (screenshots)


Nella BDV 'mano-braccio' del PAF, per ciascuno strumento la suddetta Scheda macchinario (Figura 37) contiene le caratteristiche costruttive essenziali dello strumento (come marca, modello, tipo di alimentazione, potenza, peso), una foto dello stesso, una tabella con i dati dichiarati dal costruttore ed una con i dati misurati sul campo.

Figura 37
Scheda Macchinario (HAV)


Scheda Macchinario

Marca: HUSQVARNA
Modello: 55
Tipologia: Sega a catena (motosega)
 Costruito nel: 1999
 Peso: 5.2 kg
 Potenza: 2.5 kW
 Alimentazione: Motore a scoppio benzina
 Cilindrata: 53 cc
 Dispositivi antivibranti: Assenti
 Ultimo aggiornamento: 03-11-2015
 Fonte dati: Libretto uso manutenzione

[Manuale di istruzioni ed uso acquisito in sede di misura/censimento](#)
(La redazione non risponde di eventuali modifiche e/o aggiornamenti apportati dal costruttore)



Valori dichiarati ai sensi della norma **EN ISO 22867**

	CONDIZIONE	MATERIALE	ACCESSORIO	VALORE	K ⁽¹⁾	Note
	NON INDICATO	NON INDICATO	NON INDICATO	4.9 m/s ²		Impugnatura anteriore
	NON INDICATO	NON INDICATO	NON INDICATO	7.2 m/s ²		Impugnatura posteriore

(1) Incertezza estesa

Misure sul Campo [\(Clicca per visualizzare le misure in campo\)](#)

7.2 m/s²

LAVORAZIONE: TAGLIO
MATERIALE LAVORATO: LEGNO
ACCESSORIO: NON INDICATO
COMPARTO: COSTRUZIONI EDILI

Referente: CPT Perugia (info@cptperugia.it)
Luogo: NARNI (TR) **in data** 27-06-2007
Caratteristiche accessorio: NON INDICATO

Valori relativi all'impugnatura a maggiore esposizione (Sinistra)

A _{hx} (Media aritmetica)	A _{hy} (Media aritmetica)	A _{hz} (Media aritmetica)	A _{h_v sum}
5.1	2.2 m/s ²	1.6 m/s ²	5.8 m/s ²
Deviazione standard	Deviazione standard	Deviazione standard	Deviazione standard x 1,645:
0.92 m/s ²	0.16 m/s ²	0.3 m/s ²	1.39 m/s ²

<https://www.portaleagentifisici.it/> (screenshots)

Dati dichiarati dal costruttore

Per un utensile certificato secondo standard EN/ISO pubblicati fino al 2007, la BDV del PAF riporta quanto obbligatoriamente richiesto dalla vecchia direttiva macchine ovvero:

- il valore quadratico medio ponderato dell'accelerazione;
- il riferimento allo standard di prova seguito (norma armonizzata) o una descrizione delle condizioni operative di misura.

In aggiunta, come discusso al punto 2.7.2, vengono indicati uno o più fattori moltiplicativi, estratti dal rapporto tecnico UNI CEN/TR 15350. Il corretto fattore moltiplicativo da utilizzare deve essere individuato sulla base delle effettive condizioni d'impiego del macchinario.

Per un utensile certificato secondo standard EN/ISO pubblicati dal 2008 in poi, la BDV del PAF riporta quanto obbligatoriamente richiesto dalla nuova direttiva macchine ovvero:

- il valore totale di vibrazione a_{hv} per ogni singola condizione operativa;
- l'incertezza K ;
- il riferimento allo standard di prova seguito (norma armonizzata) o una descrizione delle condizioni operative di misura.

Dati misurati in campo

Per ogni misura acquisita in campo, la BDV 'mano-braccio' mostra una scheda che contiene i valori di accelerazione misurati sui tre assi, e l'associato valore totale di vibrazione a_{hv} .

Nell'utilizzo di tali dati è importante sempre tenere presente che i risultati di misura sono molto influenzati dalle effettive condizioni operative di impiego. Pertanto è altamente sconsigliato utilizzare i dati misurati in campo riportati nella BDV qualora:

- il macchinario non è usato nelle condizioni operative indicate nella scheda descrittiva delle condizioni di misura della BDV;
- il macchinario non è in buone condizioni di manutenzione;
- il macchinario non è uguale a quello indicato in BDV (differente marca - modello).

In generale, in tutti i casi in cui è ipotizzabile che l'impiego della BDV possa portare ad una sottostima del rischio, soprattutto in relazione alle misure di tutela da mettere in atto per i lavoratori, è necessario ricorrere a misure dirette dell'esposizione a vibrazione nelle effettive condizioni di impiego dei macchinari.

E.3 LA BDV CORPO INTERO

La BDV 'corpo intero' del PAF è fondamentalmente strutturata come la BDV 'mano-braccio' descritta al precedente punto E.2. Anche in questo caso la Scheda macchinario (Figura 38) fornisce due tipologie di dati e cioè i valori di accelerazione dichiarati dal produttore e quelli misurati in campo.

Figura 38

Scheda Macchinario (WBV)

Scheda Macchinario

Marca: HYSTER
Modello: J1.80XM
Tipologia: Carrello sollevatore (muletto)
 Costruito nel: n.d.
 Peso: 3490 kg
 Potenza: 13.7 kW
 Alimentazione: Batteria 12V-48V



Valori dichiarati ai sensi della norma **UNI EN 13059:2008**

CONDIZIONE	MATERIALE	$k^{(1)}$
NON INDICATO		0.7 m/s^2
NON INDICATO		1.2 m/s^2

(1) Incertezza estesa

Misure sul Campo (Clicca per visualizzare le misure in campo)

LAVORO: MOVIMENTAZIONE MATERIALI
CARATTERISTICHE LAVORO: MOVIMENTAZIONE MATERIALI
COMPARTO: ACQUE MINERALI E BEVANDE ANALCOLICHE
ACCESSORIO: FORCHE
CARATTERISTICHE ACCESSORIO: FORCHE CARRELLO ELEVATORE
CONDIZIONI TERRENO / STRADA: STRADA: DISSESTATA
VELOCITÀ DI AVANZAMENTO: MODERATA

Referente: AUSL Toscana Sud Est-LSP-Lab. Agenti Fisici
Nome: Iole Pinto - Nicola Stacchini - Andrea Bogi (i.pinto@usl7.toscana.it)
Luogo: Siena
in data 2009-10-29
MATERIALE: componenti congelatori
Tipo terreno / strada: cemento
Condizioni terreno / strada: Strada: dissestata
Velocità di avanzamento: moderata

SEDILE
Tipo sedile: di serie
Marca sedile: NON DISPONIBILE
Modello sedile: NON DISPONIBILE
Tipo sospensioni sedile: Meccanica
Regolazioni possibili del sedile: altezza
Braccioli: Assenti

Condizioni di misura



Valori relativi alla posizione peggiore: sedile

A_{wx} (Media aritmetica):	A_{wy} (Media aritmetica)	A_{wz} (Media aritmetica)
0.2 m/s^2	0.4 m/s^2	0.9 m/s^2
dev. std. x 1,645:	dev. std. x 1,645:	dev. std. x 1,645:
0 m/s^2	0.01 m/s^2	0.05 m/s^2

<https://www.portaleagentifisici.it/> (screenshots)

Dati dichiarati dal costruttore

Per un macchinario certificato secondo standard EN/ISO pubblicati fino al 2007, la BDV riporta quanto obbligatoriamente richiesto dalla vecchia direttiva macchine ovvero:

- il valore quadratico medio ponderato dell'accelerazione;
- il riferimento allo standard di prova seguito (norma armonizzata) o una descrizione delle condizioni operative di misura.

Come discusso al punto 2.7.3, non esistono fattori di correzione per cui i valori forniti dal costruttore devono essere utilizzati tal quali, fermo restando che le stime in tal

modo ottenute per le vibrazioni alle quali l'operatore è stato realmente esposto, sono inevitabilmente meno attendibili.

Per un macchinario certificato secondo standard EN/ISO pubblicati dal 2008 in poi, la BDV riporta quanto obbligatoriamente richiesto dalla nuova direttiva macchine ovvero:

- il massimo dei valori assiali di accelerazione per ogni singola condizione operativa;
- l'incertezza di misura K;
- il riferimento allo standard di prova seguito (norma armonizzata) o una descrizione delle condizioni operative di misura.

Dati misurati in campo

Per ogni misura acquisita in campo, la BDV 'corpo intero' mostra una scheda che contiene i valori di accelerazione misurati in campo sui tre assi a_{wx} , a_{wy} , a_{wz} , e l'associato valore massimo assiale.

Non possono essere utilizzati i dati forniti misurati in campo riportati nella presente BDV 'corpo intero' se:

- il macchinario non è usato nelle condizioni operative indicate nella scheda descrittiva delle condizioni di misura della BDV;
- il macchinario non è in buone condizioni di manutenzione;
- i sedili sono rotti o in cattive condizioni di manutenzione;
- i sedili regolabili in peso non sono regolati in maniera adeguata dal lavoratore o se il sistema di regolazione è rotto;
- gli pneumatici e gli ammortizzatori non sono in buone condizioni di manutenzione;
- il macchinario non è uguale a quello indicato in BDV (differente marca e modello);
- sono presenti differenti caratteristiche del fondo stradale, velocità di guida, tipologia di sedili montati che possono incidere sui livelli di esposizione prodotti da macchinari, anche se dello stesso tipo.

Si raccomanda di non utilizzare, ai fini della valutazione del rischio vibrazioni, l'incertezza indicata nella BDV del PAF, ma di seguire il percorso specificato nell'Appendice F del presente documento, a questo tema dedicata.

APPENDICE F - INCERTEZZA

F.1 CONSIDERAZIONI GENERALI

Come nel caso dell'esposizione professionale a rumore, possono essere in generale identificati quattro contributi all'incertezza sull'esposizione professionale a vibrazioni:

- 1) un'incertezza legata alle modalità con le quali viene determinata la miglior stima del descrittore;
- 2) un'incertezza legata alle caratteristiche della strumentazione utilizzata;
- 3) un'incertezza legata al posizionamento del sensore;
- 4) un'incertezza legata al tempo di esposizione.

Nella stima di questi quattro contributi, in questa appendice verrà fatto ricorso, ove possibile, alle indicazioni contenute in due documenti normativi di grande autorevolezza in tema di incertezza, ovvero:

- la norma UNI CEI 70098-3:2016 'Incertezza di misura - Parte 3: Guida all'espressione dell'incertezza di misura', recepimento italiano della celeberrima 'Guide to uncertainty in measurements' originariamente redatta nel 1995, che fornisce metodi statistici applicabili in qualsiasi contesto;
- la norma tedesca DIN 45660-2:2018 'Guide for dealing with uncertainty in acoustics and vibration - Part 2: Uncertainty of vibration quantities'.

A meno che non sia disponibile una chiara evidenza del contrario, sia nella combinazione degli elementi 1) - 4) sopra elencati, sia nella combinazione dei sotto-contributi che confluiscono nei suddetti, si assume sempre assenza di mutua correlazione, per cui in generale l'incertezza combinata viene determinata sommando quadraticamente i diversi elementi, ovvero detta y la quantità dipendente e x_i i singoli elementi indipendenti:

$$u(y) = \sqrt{\sum_i u^2(x_i)}$$

(UNI CEI 70098-3 equazione 11, DIN 45660-2 equazione 12).

F.2 INCERTEZZA ASSOCIATA AL CAMPIONAMENTO (u_c)

F.2.1 Contributi all'incertezza sulla stima di accelerazione

Il valore di accelerazione ottenuto come risultato di una misura dipende da diversi elementi aleatori quali:

- 1) i dettagli del processo lavorativo, ovvero le modalità di impiego dell'utensile/del veicolo come ad esempio lo specifico materiale lavorato per le HAV o le caratteristiche del terreno attraversato per le WBV (DIN 45660-2 punti 5.2.4 e 5.2.5);
- 2) le condizioni ambientali (temperatura, umidità, pioggia, gelo, ecc.) che specialmente nel caso delle WBV possono alterare la consistenza del terreno/dei materiali lavorati con conseguente impatto sulle vibrazioni generate;
- 3) le condizioni di manutenzione dell'utensile/del veicolo con conseguente impatto sullo sbilanciamento delle parti rotanti/percussorie, usura ed in generale invecchiamento dell'utensile per le HAV (DIN 45660-2 punto A.2.7.3), e sulle prestazioni degli ammortizzatori del veicolo e del sedile per le WBV;
- 4) lo specifico esemplare di utensile/veicolo utilizzato (DIN 45660-2 punto A.2.7.3);
- 5) l'impedenza dell'operatore e le caratteristiche dell'accoppiamento con la sorgente della vibrazione, a loro volta determinate dalle caratteristiche antropometriche e dalla tecnica operativa dell'operatore stesso (DIN 45660-2 punto 5.2.3);
- 6) la variabilità intrinseca della vibrazione nel corso dell'operazione eseguita, che genera la cosiddetta incertezza da ripetibilità.

L'incertezza legata alle modalità con le quali viene determinata la miglior stima del descrittore è dovuta al fatto che tale stima si basa sull'esame di una frazione, tipicamente molto piccola, delle situazioni lavorative che possono praticamente verificarsi attraverso le combinazioni degli elementi da 1) a 6) sopra elencati. Essa viene pertanto comunemente indicata come incertezza da campionamento (u_c). Nelle tre sotto-sezioni F.2.2, F.2.3 e F.2.4 verranno presentati i metodi di calcolo dell'incertezza da campionamento da applicare qualora la stima dell'accelerazione venga ottenuta rispettivamente mediante misure in campo, mediante BDV e mediante le informazioni fornite dal costruttore.

La norma DIN 45660-2 contiene una trattazione piuttosto dettagliata dei diversi contributi all'incertezza. Tuttavia le informazioni ivi contenute sono risultate solo parzialmente utili per i fini di questa appendice, in considerazione dei seguenti fatti:

- a) nel titolo della norma si fa genericamente riferimento alle vibrazioni. Tuttavia mentre esiste un'appendice A dedicata alle HAV, non esiste alcuna appendice dedicata alle WBV;
- b) diversi valori numerici vengono forniti in diversi punti della norma relativamente allo stesso fenomeno, con evidente complicazione per l'utente;
- c) la Tabella A.1 della norma fornisce una serie di valori numerici molto dettagliati, relativi ai diversi contributi all'incertezza, ma limitata alla specifica tipologia dei martelli rotatori. L'articolazione è più grossolana, ed i valori numerici, ancorchè difficilmente confrontabili, apparentemente diversi, per altre tipologie di utensili quali motoseghe, seghe e smerigliatrici.

Per questo motivo solo alcune delle indicazioni numeriche fornite dalla norma DIN 45660-2 sono state utilizzate. In numerosi altri casi si è fatto ricorso a altre fonti o a semplici considerazioni logiche.

F.2.2 Metodo che prevede l'esecuzione di misure in campo

HAV

a) *Determinazione dell'incertezza da campionamento associata alla media dell'accelerazione ponderata assiale a_{hwl}*

Come già illustrato al punto 2.5.5, ciascuna accelerazione ponderata assiale a_{hwx} , a_{hwy} , a_{hwz} relativa ad una specifica operazione va calcolata come la media quadratica dei risultati delle $N = 3$ misure eseguite, pesati dai rispettivi tempi di misura, in aderenza a quanto indicato nella sezione 5.4.1 della norma UNI EN ISO 5349-2. Tuttavia l'uso di questo metodo determina una notevole complicazione formale della trattazione matematica dell'incertezza. Inoltre esso richiede di tener conto della durata di ciascuna singola misura. Nel complesso, ai fini del calcolo dell'incertezza questa procedura appare ingiustificata nella sua complessità a fronte di un miglioramento della qualità del risultato che spesso è estremamente limitato. Per una serie di misure di durata fra loro simile, la differenza fra media aritmetica e media quadratica pesata resta inferiore all'1% anche per un coefficiente di variabilità (rapporto fra deviazione standard e media) intorno al 15%. Soltanto nel caso limite in cui la durata della misura che fornisce il risultato più elevato è sostanzialmente maggiore delle altre si può giungere ad una differenza fra le due medie intorno al 3%. Si ritiene che errori di questa dimensione possano essere trascurati in questo contesto. Limitatamente al calcolo dell'incertezza, e quindi al contenuto di questa appendice, si procede pertanto assumendo che le misure eseguite siano sintetizzabili mediante la semplice media aritmetica, ovvero:

$$a_{hwl} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_{hwhi}$$

dove a_{hwhi} è la i -esima misura dell'accelerazione ponderata, relativa al generico asse l ($l = x, y, z$). L'incertezza $u(a_{hwl})$ associata al valore medio dell'accelerazione ponderata assiale a_{hwl} viene calcolata a partire dalla dispersione dei risultati delle N misure eseguite:

$$u_C(a_{hwl}) = \sqrt{\frac{1}{N}} \sigma(a_{hwl})$$

dove:

$$\sigma(a_{hwl}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (a_{hwli} - a_{hwl})^2}{N-1}}$$

è lo scarto tipo delle misure di accelerazione ponderata assiale.

b) *Determinazione dell'incertezza da campionamento associata al valore totale della vibrazione a_{hv} :*

L'incertezza da campionamento sul valore totale della vibrazione a_{hv} vale:

$$u_C(a_{hv}) = \sqrt{(0,03 a_{hv})^2 + \frac{a_{hwx}^2 u_C^2(a_{hwx}) + a_{hwy}^2 u_C^2(a_{hwy}) + a_{hwz}^2 u_C^2(a_{hwz})}{a_{hv}^2}}$$

I termini sotto radice possiedono il seguente significato:

- Il primo termine quantifica l'elemento 2) listato al punto F.2.1, e pertanto rappresenta il contributo dell'incertezza associato alle condizioni ambientali, che viene stimato pari al 3%. Si tratta di un'incertezza di tipo B secondo la definizione della UNI CEI 70098-3, ovvero determinata sulla base di informazioni estranee (preesistenti) alla misura.
- Il secondo termine è il risultato della propagazione delle incertezze sulle tre accelerazioni ponderate assiali. Nel caso della misura sullo specifico lavoratore del quale si desidera conoscere l'esposizione, esso tiene conto dell'elemento 6) mentre il contributo 5) è nullo. Se invece la misura si esegue su più lavoratori, in rappresentanza di un gruppo omogeneo (punto 2.5.3), esso tiene conto sia dell'elemento 5) che dell'elemento 6). In entrambi i casi, come è evidente dal percorso matematico seguito nella sua derivazione, si tratta di un'incertezza di tipo A secondo la definizione della UNI CEI 70098-3.
- La misura in campo viene eseguita sullo specifico utensile utilizzato, e quindi non c'è incertezza sull'esemplare utilizzato e sulle condizioni di manutenzione. Essa viene inoltre eseguita con riferimento alle reali attività lavorative. Pertanto i contributi degli elementi 1), 3) e 4) listati al punto F.2.1 sono sempre nulli.

WBV

a) *Determinazione dell'incertezza da campionamento associata alla media dell'accelerazione ponderata assiale a_{wl}*

In analogia con il caso delle HAV, si assume che ciascuna accelerazione ponderata assiale a_{wx} a_{wy} a_{wz} relativa ad una specifica operazione possa essere calcolata come semplice media aritmetica dei risultati delle $N = 3$ misure eseguite:

$$a_{wl} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_{wli}$$

dove a_{wi} è la i -esima misura dell'accelerazione ponderata relativa all'asse generico l ($l = x, y, z$). L'incertezza da ripetibilità associata al valore medio dell'accelerazione assiale viene calcolata a partire dalla dispersione dei risultati delle N misure eseguite:

$$u_R(a_{wl}) = \sqrt{\frac{1}{N}} \sigma(a_{wl})$$

dove:

$$\sigma(a_{wl}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (a_{wli} - a_{wl})^2}{N-1}}$$

è lo scarto tipo delle misure di accelerazione ponderata assiale.

In analogia a quanto discusso in precedenza per le HAV, la quantità u_R è l'incertezza da ripetibilità, e tiene conto del solo elemento 6), ovvero degli elementi 5) e 6), a seconda che la valutazione di esposizione si esegua sul singolo operatore ovvero per gruppi omogenei. Ad esso va aggiunto il termine che descrive la variabilità dovuta ai parametri ambientali. Come anticipato al punto F.2.1, ci si attende che questo contributo sia superiore nel caso delle WBV rispetto al caso HAV, e pertanto esso viene quantificato pari al 6%:

$$u_C(a_{wl}) = \sqrt{(0,06 a_{wl})^2 + u_R^2(a_{wl})}$$

La quantità $u_C(a_{wl})$ va utilizzata nel caso in cui la vibrazione venga quantificata usando come descrittore il maggiore degli A(8) assiali (punto 2.6.8).

b) *Determinazione dell'incertezza da campionamento associata al valore totale della vibrazione a_v*

L'incertezza da campionamento sul valore totale della vibrazione a_v si calcola come:

$$u_C(a_v) = \sqrt{(0,06 a_v)^2 + \frac{k_x^2 a_{wx}^2 u_R^2(a_{wx}) + k_y^2 a_{wy}^2 u_R^2(a_{wy}) + k_z^2 a_{wz}^2 u_R^2(a_{wz})}{a_v^2}}$$

Riguardo alla procedura utilizzata per ricavare questa equazione, e al significato dei diversi termini, valgono le stesse considerazioni già fatte per l'analoga quantità $u_C(a_{hv})$ nell'ambito delle HAV. L'incertezza sui pesi assiali k_i si assume nulla.

F.2.3 Metodo che prevede il recupero delle informazioni nella BDV

Rispetto al dato ottenuto che verrebbe ricavato mediante una misura in campo, il dato ottenuto mediante BDV risente del fatto che:

- 1) i dettagli del processo lavorativo sono diversi;
- 2) le condizioni ambientali sono diverse;
- 3) l'esemplare di utensile impiegato è diverso;
- 4) le condizioni di manutenzione dell'utensile sono (di conseguenza) diverse;
- 5) l'operatore è diverso.

Di conseguenza l'incertezza riportata nella BDV, che rappresenta semplicemente la variabilità associata dalla ripetizione di più misure nelle stesse condizioni operative, va integrata con le incertezze relative agli altri elementi 1), 2), 3), 4) e 5).

HAV

L'incertezza da campionamento ottenuta derivando l'informazione dalla BDV vale:

$$u_C(a_{hv}) = \sqrt{\frac{(0,05 a_{hv})^2 + (0,03 a_{hv})^2 + (0,08 a_{hv})^2 + (0,05 a_{hv})^2 + (0,15 a_{hv})^2 + a_{hwx}^2 u^2(a_{hwx}) + a_{hwy}^2 u^2(a_{hwy}) + a_{hwz}^2 u^2(a_{hwz})}{a_{hv}^2}}$$

I termini sotto radice possiedono il seguente significato, con riferimento al listato al punto F.2.1.

- Il primo termine tiene conto dell'elemento 1) e pertanto dei dettagli del processo lavorativo, ovvero le modalità di impiego dell'utensile. Esso è stimato pari al 5%.
- Il secondo termine tiene conto dell'elemento 2) e pertanto rappresenta il contributo associato alle condizioni termo-igrometriche ambientali. In analogia con quanto fatto nel caso delle misure in campo al precedente punto F.2.2, esso è stimato pari al 3%.
- Il terzo termine tiene conto dell'elemento 3). Il valore di accelerazione riportato nella BDV è infatti il risultato di una misura eseguita su un esemplare presumibilmente in condizioni di manutenzione diverse da quello utilizzato dal soggetto/dai soggetti oggetto della valutazione. La norma DIN 45660-2 discute brevemente questo contributo ma non fornisce alcuna stima quantitativa. Si stima per esso un valore pari all'8%.
- Il quarto termine tiene conto dell'elemento 4). Il valore riportato di accelerazione riportato nella BDV è infatti il risultato di una misura eseguita su un esemplare diverso da quello utilizzato dal soggetto/dai soggetti oggetto della valutazione. Sulla base del valore riportato nella DIN 45660-2, Tabella A.1, si stima un valore pari al 5%.
- Il quinto termine tiene conto dell'elemento 5) per il quale si stima un valore pari al 15%.
- Infine il sesto termine è il risultato della propagazione delle incertezze sulle tre accelerazioni ponderate assiali contenute nella BDV. Tali incertezze sono relative

alla semplice variabilità associate alla ripetizione di più misure nelle stesse condizioni operative, per cui tengono conto esclusivamente dell'elemento 6) della lista di cui al punto F.2.1. È importante chiarire inoltre che nella BDV la variabilità sulle tre accelerazioni assiali è quantificata, sia per le HAV che per WBV, mediante la deviazione standard. Poiché il risultato è stato ottenuto, come specificato nel PAF, eseguendo almeno tre misure, essa va, in coerenza con quanto fatto nel precedente punto F.2.2, divisa per $\sqrt{3}$. Il dato riportato nella BDV riguardo alla variabilità del valore totale di vibrazioni (ultimo a destra della seconda fila), va ignorato.

WBV

Il quadro relativo alle WBV è formalmente analogo a quello tratteggiato in precedenza per le HAV. Ai fini del calcolo dell'incertezza va ovviamente distinto il caso monoassiale dal caso triassiale.

Nel caso monoassiale si ha:

$$u_C(a_{wI}) = \sqrt{(0,05 a_{wI})^2 + (0,06 a_{wI})^2 + (0,05 a_{wI})^2 + (0,05 a_{wI})^2 + (0,10 a_{wI})^2 + u_R^2(a_{wI})}$$

dove, in analogia a quanto discusso per le HAV, l'incertezza da ripetibilità $u_R(a_{wI})$ si ottiene dividendo per $\sqrt{3}$ la quantità riportata nella BDV, che rappresenta la semplice deviazione standard associata alla ripetizione di più misure nelle stesse condizioni operative.

Nel caso triassiale si ha:

$$u_C(a_v) = \sqrt{\frac{(0,05 a_v)^2 + (0,06 a_v)^2 + (0,05 a_v)^2 + (0,05 a_v)^2 + (0,10 a_v)^2 + k_x^2 a_{wx}^2 u^2(a_{wx}) + k_y^2 a_{wy}^2 u^2(a_{wy}) + k_z^2 a_{wz}^2 u^2(a_{wz})}{a_v^2}}$$

nella quale i termini sotto radice possiedono lo stesso significato già illustrato per le HAV.

I valori numerici degli elementi 3) e 5), inferiori agli analoghi stimati per le HAV, riflettono il fatto che la dipendenza della vibrazione dalle condizioni di manutenzione del veicolo e dalle caratteristiche dell'operatore non è così pronunciata per le WBV come per le HAV.

F.2.4 Metodo che prevede l'uso delle informazioni fornite dal fabbricante

HAV

A questo riguardo è necessario distinguere fra due tipologie di utensili.

■ Utensili 'meno recenti'

Gli utensili meno recenti presentano una dichiarazione dei dati relativi alla vibrazione che fa riferimento a standard di vecchia concezione, nei quali le condizioni di prova non sono rappresentative della realtà, e nei quali non viene riportato alcun dato di incertezza. Per supplire alla artificiosità delle condizioni di prova, a tali utensili si applicano dei fattori correttivi moltiplicativi F_{corr} indicati nel rapporto tecnico UNI CEN/TR 15350 (vedi il punto 2.7.2) che assumono valori pari a 1, 1,5 o 2. L'utilizzo di valori di questo tipo introduce inevitabilmente un'incertezza 'da discretizzazione' che può essere stimata assumendo una distribuzione di probabilità rettangolare, ovvero piatta all'interno dell'intervallo rilevante. Per una distribuzione di questo tipo si ha (UNI CEI 70098-3) $u(F_{corr}) = 0,25/\sqrt{3} = 0,144$.

In riferimento agli elementi citati al punto F.2.1 come elementi di variabilità, possiamo dire che il fattore correttivo moltiplicativo F tiene conto delle differenze fra prova di certificazione e prova in campo per quanto riguarda il solo punto 1) modalità di impiego dell'utensile. Esso tuttavia non può tener conto degli altri elementi: 2) parametri fisici ambientali (temperatura, umidità ecc.), 3) condizioni di manutenzione dell'utensile, 4) specifico esemplare utilizzato; 5) caratteristiche fisiche, tecnica operativa e esperienza dell'operatore. Questi elementi non danno luogo a differenze sistematiche trattabili con un fattore moltiplicativo ma ad una variabilità e quindi ad una incertezza. La dichiarazione del costruttore non prevede alcun dato di incertezza, per cui resta ignota l'incertezza da ripetibilità, che qui si assume tentativamente pari al 5%.

Sulla base di quanto detto al punto precedente, l'incertezza complessiva associata agli elementi 2) 3) 4) 5) 6) è pari circa al 19%.

In sintesi, detto a_{dich} il valore totale di vibrazione dichiarato dal fabbricante, per l'incertezza da campionamento ottenuta derivando l'informazione dai dati forniti dal fabbricante (fino al 2007) si ha:

$$u_C(a_{hv}) = \sqrt{u^2(F_{corr})a_{dich}^2 + u^2(a_{dich})F_{corr}^2} = \sqrt{0,144^2 a_{dich}^2 + 0,19^2 a_{dich}^2 F_{corr}^2}$$

■ Utensili 'più recenti'

Gli utensili più recenti presentano una dichiarazione dei dati relativi alla vibrazione redatta in aderenza a standard di prova che fanno riferimento alla norma UNI EN 20643 e quindi considerano modalità di impiego realistiche. In questo modo si tiene conto in modo adeguato degli effetti legati alla modalità di impiego, per cui ai valori di accelerazione non va applicato alcun fattore correttivo moltiplicativo ed azzerato il contributo 1) della lista di cui al punto F.2.1.

La norma UNI EN 20643 fa a sua volta riferimento alla norma UNI EN 12096 che stabilisce come ricavare i dati di accelerazione e di incertezza da riportare ai fini della certificazione del macchinario. In particolare, relativamente all'incertezza, la norma UNI EN 12096 prescrive che essa venga caratterizzata mediante una quantità K direttamente proporzionale allo scarto tipo totale s_t . Nel caso, comune, in cui la certificazione avvenga per un lotto di macchine, lo scarto tipo totale s_t tiene conto:

- sia dell'incertezza da ripetibilità (punto 6), che comprende anche variazioni delle condizioni ambientali (punto 2) e variazioni delle caratteristiche dell'operatore (punto 5);
- sia dell'incertezza legata alla variabilità fra diversi esemplari del macchinario (punto 4).

Manca soltanto il contributo associato alle condizioni di manutenzione del macchinario (punto 3), per il quale, in coerenza con quanto ipotizzato al punto F.2.2, si assume un valore pari all'8%.

In definitiva, detto $s_t = K/1,5$ (UNI EN 12096, equazione (B.3)) lo scarto tipo totale, nel caso in cui si utilizzi il dato dichiarato dal fabbricante si ha:

$$u_C(a_{hv}) = \sqrt{s_t^2 + 0,08^2 a_{dich}^2}$$

WBV

Gli standard di prova per veicoli e macchinari contemplano generalmente condizioni di prova scarsamente rappresentative della realtà; inoltre essi non richiedono che venga indicato alcun dato di incertezza. Tuttavia, come già discusso al punto 2.7.2, al contrario di quanto avviene per le HAV, non è attualmente previsto alcun fattore correttivo moltiplicativo tale da compensare una possibile sottostima.

Le considerazioni fatte per le informazioni derivate dalla BDV conducono a stimare un rapporto fra le incertezze sulle WBV le incertezze sulle HAV pari a circa 2/3. L'incertezza complessiva (punti da 1 a 6) ricavata in precedenza per i macchinari HAV 'meno recenti' vale circa il 19% del dato dichiarato. A questo va aggiunto il contributo dell'incertezza da ripetibilità, in precedenza quantificato pari al 5%. In definitiva si giunge ad una stima, francamente molto grossolana, dell'incertezza da campionamento per i macchinari sorgenti di WBV nel caso di utilizzo del dato fornito dal fabbricante pari a circa $19,5 \times 2/3 = 13\%$, ovvero:

$$u_C(a_{wl}) = 0,13a_{wl}$$

nel caso monoassiale, e

$$u_C(a_v) = 0,13a_v$$

nel caso triassiale.

F.3 INCERTEZZA ASSOCIATA ALLE CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE (U_s)

Questa incertezza può essere stimata sulla base delle indicazioni contenute nella norma UNI 11568. In questa norma il modello metrologico della catena di misurazione viene schematizzato nella Figura 39.

Per il calcolo dell'incertezza strumentale occorre pertanto sommare i singoli contributi derivanti dalla presenza del trasduttore, del condizionatore di segnale e dello strumento di acquisizione. L'incertezza tipo della catena di misurazione può quindi essere espressa nella relazione:

$$u_s = \sqrt{u_t^2 + u_n^2 + u_a^2}$$

dove:

- u_t è l'incertezza dovuta al trasduttore;
- u_n è l'incertezza dovuta al condizionatore di segnale;
- u_a è l'incertezza dovuta allo strumento di acquisizione, calcolo ed elaborazione del segnale.



(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

I valori di u_t , u_n e u_a sono in generale desumibili dai certificati di taratura, e risultano articolati nei diversi rispettivi contributi u_{ti} , u_{ni} , u_{ai} , associati alla sensibilità nominale, alla linearità, alla risposta in frequenza, ecc. Tali contributi si sommano quadraticamente perciò, detto u_{xi} il contributo i -esimo all'incertezza di un generico componente x ($x = t, n, a$), si ha:

$$u_x = \sqrt{\sum_i u_{xi}^2}$$

Tabella 14 Contributi all'incertezza strumentale			
Contributi all'incertezza	Trasduttore (U_t)	Condizionatore (U_n)	Acquisitore (U_a)
Sensibilità nominale	5%		
Linearità		1%	0,1 dB \approx 1%
Risposta in frequenza	3%	5%	0,05 dB \approx 0,5%
Circuito rms			1,2 dB \approx 15%

In generale le incertezze vengono riportate nei certificati di taratura della strumentazione come incertezze estese U_{xi} corrispondenti ad un intervallo di confidenza bilaterale del 95%. Assumendo una distribuzione normale, è possibile ricavare le incertezze u_{xi} dividendo per 2 i valori dichiarati U_{xi} .

Qualora invece i certificati di taratura della strumentazione non siano reperibili, viene messo a disposizione dalla norma UNI 11568 un prospetto, qui replicato nella Tabella 14, che riporta i valori tipici di incertezza estesa U_{xi} , utili per una stima (indicativa) dell'incertezza strumentale. La combinazione di tutti i contributi elencati nella Tabella 14 conduce ad un'incertezza estesa del 17% e quindi ad un'incertezza $u_s = 8,5\%$. Questo valore risulta in eccellente accordo col valore 7,5% indicato al punto 5.3.3 della norma DIN 45660-2.

F.4 INCERTEZZA ASSOCIATA AL POSIZIONAMENTO E ALL'ORIENTAMENTO DEL SENSORE, E ALL'ACCOPIAMENTO CON IL MACCHINARIO (U_i)

A differenza del contributo del posizionamento del microfono all'incertezza sul livello di esposizione a rumore, per il quale la norma UNI EN ISO 9612 fornisce dati precisi, per le vibrazioni non esistono indicazioni fornite dagli standard tecnici internazionali. Si può invece far riferimento ad uno studio inglese (Tyler et al., 2004) che ha indagato nel dettaglio le incertezze legate a questo aspetto.

HAV

I risultati per le HAV indicano un'incertezza non superiore al 3%, per cui si assume cautelativamente:

$$u_L(a_{hv}) = 0,03a_{hv}$$

WBV

I risultati per le WBV indicano un'incertezza non superiore al 6%, per cui si assume cautelativamente:

$$u_L(a_{wl}) = 0,06a_{wl}$$

$$u_L(a_v) = 0,06a_v$$

Il valore maggiore assunto da questo contributo per le WBV rispetto alle HAV può essere dovuto al fatto che i singoli valori assiali possono essere alterati dalla non perfetta coincidenza degli assi del sensore con gli assi del sistema di riferimento mostrato nella Figura 9. La norma UNI EN 1032 consente una tolleranza fino a $\pm 15^\circ$. A titolo di esempio uno scarto di 15° sulla direzione dell'asse z determina un errore di circa il 3% sulla misura di a_{wz} .

F.5 INCERTEZZA COMPOSTA SUL DESCRITTORE DI ACCELERAZIONE

HAV

Come anticipato al punto F.1, è generalmente possibile considerare perfettamente scorrelati fra di loro i tre contributi dovuti al campionamento (F.2), alla strumentazione (F.3) e al posizionamento/accoppiamento del sensore (F.4). Pertanto l'incertezza composta sul valore totale della vibrazione a_{hv} è data dalla somma quadratica di tali contributi:

$$u(a_{hv}) = \sqrt{u_C^2(a_{hv}) + u_S^2(a_{hv}) + u_L^2(a_{hv})}$$

WBV

Come per le HAV, anche per le WBV è generalmente possibile considerare perfettamente scorrelati fra di loro i tre contributi dovuti al campionamento (F.2), alla strumentazione (F.3) e al posizionamento/accoppiamento del sensore (F.4). Pertanto l'incertezza composta è data dalla somma quadratica di tali contributi.

Nel caso in cui si utilizzi il descrittore monoassiale relativo all'asse dominante, si ha:

$$u(a_{wl}) = \sqrt{u_C^2(a_{wl}) + u_S^2(a_{wl}) + u_L^2(a_{wl})}$$

mentre nel caso in cui si utilizzi il descrittore triassiale (valore totale di vibrazione), si ha:

$$u(a_v) = \sqrt{u_C^2(a_v) + u_S^2(a_v) + u_L^2(a_v)}$$

F.6 INCERTEZZA ASSOCIATA ALLA STIMA DEL TEMPO DI ESPOSIZIONE (U_t)

L'incertezza nella determinazione del tempo di esposizione consiste di contributi legati all'incertezza:

- a) sulla durata del ciclo lavorativo con esposizione a vibrazioni;
- b) sul numero di tali cicli lavorativi nella giornata;
- c) sulla frazione del ciclo nella quale vi è effettivo utilizzo dell'utensile vibrante da parte del lavoratore. Ciò dipende dalla frequente confusione esiste fra il tempo di utilizzo complessivo dell'utensile e il tempo di effettiva esposizione alle vibrazioni prodotte dall'utensile.

Generalmente è assai difficile ottenere informazioni specifiche su questi singoli contributi. Una stima complessiva dell'incertezza associata a P determinazioni del tempo di

esposizione la cui media aritmetica sia T_m , si ottiene mediante l'equazione (A.3) della norma DIN 45660-2:

$$u(T_m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^P (T_i - T_m)^2}{P(P-1)}}$$

che fra l'altro coincide con quella proposta dalla norma UNI EN ISO 9612 sull'esposizione professionale a rumore. Questa equazione assume che sia possibile ottenere $P \geq 3$ stime indipendenti T_i , anche con metodi e/o da fonti diverse. Se al contrario si dispone semplicemente di una stima massima e di una stima minima del tempo di esposizione, si utilizza l'espressione semplificata:

$$u(T_m) = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$$

anch'essa suggerita dalla norma UNI EN ISO 9612. Si raccomanda di non confondere l'incertezza sul tempo di esposizione con la variabilità del tempo di esposizione fra le varie giornate lavorative. A questo riguardo si fa riferimento al comma 2 dell'art. 201 del d.lgs. 81/2008, nel quale viene precisato che *'nel caso di variabilità del livello di esposizione giornaliero va considerato il livello giornaliero massimo ricorrente'*.

F.7 INCERTEZZA SUL DESCRITTORE DI ESPOSIZIONE

HAV

L'incertezza sull'esposizione giornaliera $A(8)$ alle HAV si ottiene applicando l'equazione generale di propagazione dell'incertezza contenuta nella norma UNI CEI 70098-3:2016:

$$u(A(8)) = \sqrt{\sum_{j=1}^M \left(\frac{\partial A(8)}{\partial a_{hvj}} \right)^2 u^2(a_{hvj}) + \left(\frac{\partial A(8)}{\partial T_{ej}} \right)^2 u^2(T_{ej})}$$

dove:

$$\frac{\partial A(8)}{\partial a_{hvj}} = \frac{a_{hvj}}{A(8)} \frac{T_{ej}}{T_0}$$

e

$$\frac{\partial A(8)}{\partial T_{ej}} = \frac{1}{2T_0} \frac{a_{hvj}^2}{A(8)}$$

In queste equazioni:

- a_{hvj} è il valore totale della vibrazione stimato per la j -esima delle M attività
- $u(a_{hvj})$ è l'incertezza su a_{hvj}
- T_{ej} è il tempo di esposizione relativo alla j -esima delle M attività
- $u(T_{ej})$ è l'incertezza su T_{ej}
- T_0 è il tempo di riferimento pari ad 8 ore.

WBV

Descrittore monoassiale

In questo caso si utilizzano le stesse espressioni ricavate per l'incertezza su $A(8)$ per le HAV, semplicemente sostituendo ai valori totali di vibrazione HAV per le diverse attività (a_{hvj}) le accelerazioni ponderate a_{wj} relative all'asse l tale che $A_l(8) > 0,8 A(8)$ (vedi il punto 2.6.8).

Descrittore triassiale

In questo caso si utilizzano le stesse espressioni ricavate per l'incertezza su $A(8)$ per le HAV, semplicemente sostituendo ai valori totali di vibrazione HAV per le diverse attività (a_{hvj}) i valori totali di vibrazione WBV (a_{vj}).

F.8 INCERTEZZA SUL DESCRITTORE DI VIBRAZIONE SU PERIODI BREVI

HAV & WBV

Come indicato ai punti 2.5.8 e 2.6.9, l'esposizione su periodi brevi viene quantificata mediante il più elevato dei valori di accelerazione ottenuti nelle tre misure eseguite su un soggetto. Con tre misure, la differenza tra la misura più alta e quella più bassa è pari a circa due volte la deviazione standard, quindi il massimo delle tre misure può essere stimato pari alla media più la deviazione standard, ossia l'84° percentile della distribuzione. L'incertezza sul valore di esposizione su periodi brevi è quindi deducibile, in linea di principio, utilizzando i metodi statistici per la stima di un dato percentile di una distribuzione, e quindi conoscibile anche quando l'accelerazione risulta stimata a partire da informazioni riportate nelle BDV o dal fabbricante. Tuttavia, considerando che:

- a) il valore limite di esposizione su periodi brevi è un descrittore la cui valenza prevenzionistica non è paragonabile a quella di $A(8)$;
- b) stime di incertezza basate su tre sole misure, o ancor più su inferenze statistiche a loro volta dedotte da descrittori sintetici quali valori medi e deviazioni standard, sono estremamente incerte.

Si ritiene attualmente inopportuno fornire indicazioni in proposito.

F.9 INCERTEZZA SUL VDV

Consideriamo il caso generale nel quale il tempo di misura di VDV (T_{mis}) è inferiore al tempo di esposizione (T_e), in cui il VDV relativo al tempo di esposizione si calcola come:

$$\text{VDV}(T_e) = \text{VDV}(T_{\text{mis}}) \sqrt[4]{\frac{T_e}{T_{\text{mis}}}}$$

L'incertezza su $\text{VDV}(T_e)$ si ottiene propagando le incertezze su $\text{VDV}(T_{\text{mis}})$ e su T_e , assumendo che T_{mis} sia noto senza incertezza:

$$u(\text{VDV}(T_e)) = \sqrt[4]{\frac{T_e}{T_{\text{mis}}}} \times \sqrt{u^2(\text{VDV}(T_{\text{mis}})) + \left(\frac{1}{4} \frac{u(T_e)}{T_e}\right)^2 \text{VDV}^2(T_{\text{mis}})}$$

Poiché il VDV è una misura integrale, ad esso non è associata alcuna incertezza da campionamento. L'incertezza su $\text{VDV}(T_{\text{mis}})$ si ottiene pertanto sommando opportunamente i contributi dovuti all'incertezza strumentale e all'incertezza sul posizionamento, già discussi ai punti F.3 ed F.4:

$$\frac{u(\text{VDV}(T_{\text{mis}}))}{\text{VDV}(T_{\text{mis}})} = \sqrt{u_s^2 + u_L^2}$$

dove u_s e u_L vanno intesi in termini percentuali.

L'espressione per $u(\text{VDV}(T_e))$ è pertanto:

$$u(\text{VDV}(T_e)) = \text{VDV}(T_e) \times \sqrt{u_s^2 + u_L^2 + \left(\frac{1}{4} \frac{u(T_e)}{T_e}\right)^2}$$

Nel caso in cui l'esposizione giornaliera si componga di M esposizioni, ognuna delle quali caratterizzata da un proprio valore VDV, l'incertezza sul VDV complessivo si calcola mediante l'espressione:

$$u(\text{VDV}) = \frac{1}{\text{VDV}^3} \times \sqrt{\sum_{j=1}^M \text{VDV}_j^6 u^2(\text{VDV}_j)}$$

derivata applicando l'equazione generale di propagazione dell'incertezza (UNI CEI 70098-3:2016). In pratica si tratta di una media delle incertezze sui singoli VDV_i , opportunamente pesata dai VDV_i stessi.

F.10 INCERTEZZA ESTESA

Se l'incertezza è utilizzata nel contesto del confronto fra un valore sperimentalmente misurato/stimato ed un valore limite, l'incertezza estesa va calcolata in riferimento ad un intervallo di confidenza monolaterale. Poiché grazie al teorema del limite centrale è possibile supporre che la distribuzione di $A(8)$ sia approssimativamente gaussiana, ed assumendo, come di consueto, un livello di confidenza del 95%, va adottato un fattore di copertura $k = 1,645$. L'espressione per il calcolo dell'incertezza estesa associata all'esposizione giornaliera $A(8)$ è dunque:

$$U(A(8)) = 1,645 \times u(A(8))$$

Se al contrario l'incertezza è utilizzata in contesti diversi dal confronto con i limiti, l'incertezza estesa va calcolata in riferimento ad un intervallo di confidenza bilaterale. Con le stesse assunzioni fatte in precedenza, il fattore di copertura adeguato è $k = 1,96$. L'espressione per il calcolo dell'incertezza estesa associata all'esposizione giornaliera $A(8)$ è dunque:

$$U(A(8)) = 1,96 \times u(A(8))$$

Espressioni analoghe si applicano all'incertezza estesa sul VDV.

F.11 CONFRONTO CON VALORI SOGLIA

Come già chiarito al punto 2.10, a differenza di quanto previsto per la valutazione del rischio rumore, nel Capo III del Titolo VIII del d.lgs. 81/2008 non viene richiesto al DL di tenere conto dell'incertezza delle misure nel quadro della valutazione del rischio vibrazioni. Questa assenza non è specifica della legislazione italiana in quanto neppure la direttiva europea 2002/44/CE, della quale il d.lgs. 81/2008 rappresenta il recepimento aggiornato, non cita mai il termine incertezza.

Ciò premesso, se si desidera confrontare il valore calcolato di $A(8)$ con una qualsiasi soglia, è possibile utilizzare il metodo illustrato nella norma UNI/TS 11326-2 per l'esposizione a rumore. Trattandosi di un caso di tutela del lavoratore, l'incertezza si applica in favore del medesimo e pertanto la soglia deve considerarsi non superata se e solo se viene soddisfatta la disequaglianza:

$$A(8) + U(A(8)) = A(8) + 1,645 \times u(A(8)) < \text{Soglia}$$

Un'espressione analoga si applica al confronto con le soglie definite per il VDV.

APPENDICE G - STRUMENTAZIONE

Il metodo più comune per misurare le vibrazioni è quello di utilizzare un accelerometro posizionato sulla superficie vibrante, in grado di rilevare le oscillazioni provenienti dalla superficie stessa, trasformandole in segnali elettrici. La scelta del corretto accelerometro è definita, in generale, dall'intensità e dall'intervallo di frequenze della vibrazione prevista, dalle caratteristiche fisiche della superficie sottoposta a misurazione e dall'ambiente nel quale l'accelerometro viene utilizzato. È pertanto raccomandato un attento esame delle caratteristiche dei vari accelerometri a disposizione prima di procedere alla misura.

Una volta fissato l'accelerometro (o gli accelerometri) alla superficie vibrante, i segnali elettrici prodotti dall'accelerometro stesso vengono poi inviati, per l'elaborazione, a strumenti portatili (vibrometri), più semplici, oppure ad acquisitori multicanale, più sofisticati ma anche più ingombranti e costosi.

In entrambi i casi, solitamente, è possibile ottenere i valori di esposizione richiesti per il confronto con i valori limite e d'azione vigenti ma, mentre nel caso dei vibrometri (Figura 40) ci si deve spesso accontentare delle analisi già implementate nello strumento stesso, nel caso degli acquisitori multicanale (Figura 41), quasi sempre corredati di software installato su personal computer, si ha la possibilità di effettuare analisi in frequenza spesso più complesse (ad esempio, in bande di frazione di ottava o bande strette), di memorizzare un maggior numero di dati (cosa

Figura 40 Esempio di vibrometro portatile



(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

Figura 41 Esempio di acquisitore con PC



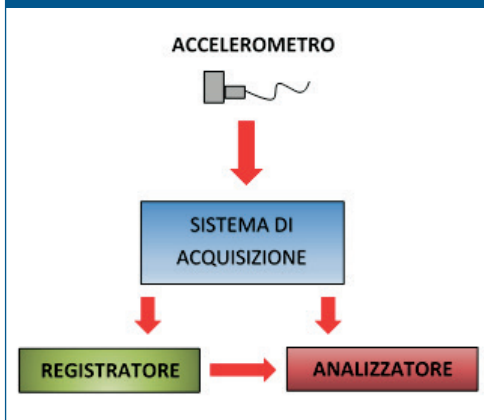
(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

che richiede una maggior quantità di memoria fisica) e a volte di poter implementare algoritmi con codici di calcolo più o meno articolati.

In generale, quindi, una tipica catena di misura per vibrazioni comprende un accelerometro, un sistema di acquisizione, un registratore ed un analizzatore (Figura 42).

Le rilevazioni al sistema mano-braccio vengono solitamente eseguite utilizzando accelerometri triassiali (in grado, cioè, di rilevare contemporaneamente le accelerazioni su tre assi ortogonali tra loro) fissati meccanicamente sull'attrezzatura oggetto di indagine oppure con appositi adattatori che vengono scelti, di volta in volta, in funzione della tipologia di impugnatura presente. Le già citate norme UNI EN ISO 10819 e UNI EN ISO 5349-2 riportano una descrizione della maggior parte degli adattatori presenti sul mercato (alcuni dei quali sono raffigurati nella Figura 43).

Figura 42 Schema generale di una catena di misura per vibrazioni



(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

Figura 43

Esempi di accelerometri e relativi adattatori per HAV



(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

Per quanto concerne il corpo intero, vengono utilizzati accelerometri triassiali (più raramente monoassiali) fissati alle superfici vibranti meccanicamente o tramite adattatori per la possibilità di rilevare vibrazioni su superfici deformabili (Figura 44), come indicato dalla norma UNI EN ISO 10326-1:2016.

Nella Tabella 15 sono riportate alcune tra le più comuni tecniche di fissaggio meccanico degli accelerometri. Per una trattazione più accurata ed esaustiva si rimanda, invece, alla norma UNI ISO 5348:2007.

La strumentazione di misura per le vibrazioni deve essere conforme a quanto richiesto dalle norme UNI EN ISO 5349-1:2004 e UNI EN ISO 5349-2:2015 per le vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio (HAV) e dalla UNI ISO 2631-1:2014 per le vibrazioni trasmesse al corpo intero (WBV), ed alle norme tecniche ivi richiamate.

La strumentazione deve essere calibrata, prima e dopo ogni serie di misure, con un calibratore conforme alla norma UNI EN ISO 8041-1:2017. Le tarature debbono avvenire, con periodicità biennale⁴, presso laboratori LAT (Laboratori di taratura del sistema ACCREDIA) o EA (European Cooperation for Accreditation).

Figura 44**Accelerometri e sistemi di fissaggio per WBV**

(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

⁴ In caso di eventi meccanici, termici o di diversa natura che possano determinare modifiche al comportamento della strumentazione, occorre ripetere la taratura con frequenze maggiori.

Tabella 15 Esempi di comuni tecniche di fissaggio di accelerometri		
Tipo	Principali vantaggi	Principali svantaggi
Colla/cera	Facilità di fissaggio Buona risposta in frequenza	La superficie di contatto deve essere il più possibile pulita (da olio). Difficilmente utilizzabile per materiali resilienti. Efficienza del fissaggio dipendente dalla temperatura.
Vite	Buona risposta in frequenza Possibilità di impiego con filtri meccanici	Nella pratica è di difficile applicazione
Magnete	Facilità di fissaggio	La superficie di fissaggio deve essere il più possibile estesa e liscia La forza magnetica deve essere maggiore possibile. Non utilizzabile su superfici non ferromagnetiche
Nastro biadesivo	Facilità di fissaggio Efficienza del fissaggio poco dipendente dalla temperatura.	La superficie di contatto deve essere il più possibile ampia, liscia e pulita.

Anche in base a quanto in precedenza esposto, per caratterizzare un fenomeno vibratorio ed i suoi effetti sui soggetti esposti è necessario che la strumentazione di misura sia in grado di definire:

- i tempi di esposizione;
- l'intensità della vibrazione, normalmente in m/s^2 ;
- la composizione in frequenza della vibrazione;
- l'eventuale presenza di vibrazioni impulsive e le relative caratteristiche (periodicità, valore di picco);
- gli assi lungo cui si propaga la vibrazione.

APPENDICE H - ESEMPI DI CALCOLO DELL'ESPOSIZIONE

H.1 HAV - ESPOSIZIONE DOVUTA AD UNA SOLA LAVORAZIONE

L'esposizione alle HAV di un lavoratore è dovuta esclusivamente ad una attività di smerigliatura. Per tale attività viene utilizzata una smerigliatrice Bosch modello GWS 24-230 JVX. La BDV non contiene dati su questo utensile. Il fabbricante dichiara che il valore totale di vibrazione è di $6,5 \text{ m/s}^2$ (smerigliatura) senza ulteriori dettagli. Poiché l'utensile viene utilizzato su numerose superfici, si ritiene opportuno procedere all'esecuzione di misure. La Tabella 16 mostra per ciascuna delle tre misure eseguite:

- colonna 1) - l'indice sequenziale della misura;
- colonne 2) - 4) le tre accelerazioni ponderate assiali;
- colonna 5) - il tempo di misura (non inferiore a 20 secondi, vedi punto 2.5.4).

Tabella 16		Dettaglio delle misure eseguite			
Misura	$a_{\text{hw}x}$ (m/s^2)	$a_{\text{hw}y}$ (m/s^2)	$a_{\text{hw}z}$ (m/s^2)	T_m (s)	
1	4,9	3,0	9,8	25,8	
2	5,6	4,2	10,8	31,2	
3	5,1	3,5	8,7	30,7	

L'accelerazione media viene calcolata per ciascun asse eseguendo la radice quadrata della somma dei quadrati dei risultati ottenuti nelle singole misure, pesati dai relativi tempi di misura (media quadratica, UNI EN ISO 5349-2). L'incertezza da ripetibilità si deriva invece a partire dalla media lineare (vedi appendice F). La differenza fra la media aritmetica e la media quadratica è sempre inferiore al 2% per le tre accelerazioni assiali, e inferiore all'1,5% per il valore totale di vibrazione di a_{hv} ed è dunque totalmente trascurabile.

Tabella 17		Valori medi e incertezze		
	$a_{\text{hw}x}$ (m/s^2)	$a_{\text{hw}y}$ (m/s^2)	$a_{\text{hw}z}$ (m/s^2)	
Media quadratica	5,23	3,63	9,81	
Media lineare	5,20	3,57	9,77	
Incetezza da ripetibilità	0,21	0,35	0,61	

La Tabella 17 mostra per ciascuna delle tre accelerazioni assiali:

- riga 1) - la media quadratica
- riga 2) - la media lineare
- riga 3) - l'incertezza da ripetibilità

Il descrittore della vibrazione è il valore totale di vibrazione a_{hv} , il cui valore medio viene ottenuto come radice quadrata della somma dei quadrati dei tre contributi assiali mostrati nella tabella precedente:

$$a_{hv} = 11,7 \text{ m/s}^2$$

con una incertezza da ripetibilità $u_R(a_{hv}) = 0,53 \text{ m/s}^2$. Questo valore va combinato con gli altri contributi illustrati al punto F.2.3 per ottenere il valore complessivo dell'incertezza da campionamento:

$$u_C(a_{hv}) = 0,63 \text{ m/s}^2$$

Le altre componenti dell'incertezza valgono rispettivamente:

$u_S(a_{hv}) = 0,99 \text{ m/s}^2$ l'incertezza della strumentazione;

$u_L(a_{hv}) = 0,35 \text{ m/s}^2$ l'incertezza da posizionamento.

L'incertezza globale sul valore totale di vibrazioni si ottiene combinando quadraticamente le tre incertezze $u_C(a_{hv})$, $u_S(a_{hv})$ e $u_L(a_{hv})$, e vale $u(a_{hv}) = 1,22 \text{ m/s}^2$.

Due stime indipendenti del tempo di esposizione vengono ottenute a partire dal numero di lavorazioni eseguite e dalla dichiarazione del RLS. I valori ottenuti sono pari a 45 e 60 minuti rispettivamente (da intendersi come tempo netto di uso della smerigliatrice). Si ottiene pertanto un valore medio del tempo di esposizione:

$$T_e = 52,5 \text{ minuti}$$

con un'associata incertezza $u(T_e) = 7,5 \text{ minuti}$.

L'esposizione quotidiana alle vibrazioni A(8) risulta pertanto pari a:

$$A(8) = a_{hv} \sqrt{\frac{T_e}{T_0}} = 11,7 \sqrt{\frac{52,5}{480}} = 3,9 \text{ m/s}^2$$

con un'incertezza $u(A(8)) = 0,5 \text{ m/s}^2$, prevalentemente dovuta all'incertezza strumentale.

L'esposizione giornaliera alle vibrazioni risulta compresa fra il valore di azione di $2,5 \text{ m/s}^2$ e il valore limite di esposizione di 5 m/s^2 . È necessario pertanto redigere ed attua-

re un piano di riduzione del rischio, e mettere in opera le altre indicazioni riportate nella seconda fascia (gialla) della Tabella 4. Successivamente, il DL dovrà provvedere alla rivalutazione del rischio verificando l'effettiva riduzione dell'esposizione del lavoratore, a seguito delle misure attuate.

L'esposizione su periodi brevi è pari al più alto dei valori totali di vibrazione misurati, ovvero $12,9 \text{ m/s}^2$, e risulta pertanto inferiore al pertinente valore limite di 20 m/s^2 .

H.2 HAV - ESPOSIZIONE DOVUTA A DIVERSE LAVORAZIONI

L'esposizione alle HAV di un lavoratore è il risultato di quattro diverse lavorazioni.

H.2.1 Dettaglio delle lavorazioni

La **lavorazione 1** consiste nella perforazione di uno strato di cemento. Per tale operazione viene utilizzato un martello perforatore Milwaukee modello PHE 40SQ. La vibrazione di questo utensile è riportata nella BDV per l'operazione di foratura del calcestruzzo. Si utilizzano pertanto i valori ivi riportati, limitatamente alle tre accelerazioni assiali e alle relative incertezze. Riguardo al tempo di esposizione, si dispone semplicemente di una stima minima e di una stima massima pari rispettivamente a 20 e 40 minuti.

La **lavorazione 2** consiste nella levigatura di diverse superfici. Per tale operazione viene utilizzata una smerigliatrice DeWalt modello DWE 4559. La BDV non contiene misure in campo relative a questo utensile. Il fabbricante dichiara un valore totale di vibrazione di 7 m/s^2 ed un valore $K = 1,5 \text{ m/s}^2$, ai sensi della nuova direttiva macchine. Poiché questo utensile è dichiarato in conformità con la nuova direttiva macchine 2006/42/EC, nessun fattore di correzione va applicato. Riguardo al tempo di esposizione, si dispone semplicemente di una stima minima e di una stima massima, anche in questo caso pari rispettivamente a 20 e 40 minuti.

La **lavorazione 3** consiste nella demolizione di calcestruzzo. Per tale operazione viene utilizzato un martello demolitore DeWalt D25600K. Per questo attrezzo la BDV riporta due valori, uno di $8,3 \text{ m/s}^2$ per la demolizione del calcestruzzo, e l'altro di $10,4 \text{ m/s}^2$ per attività di demolizione non meglio specificate. Entrambi i valori risultano considerevolmente inferiori al valore dichiarato dal fabbricante per perforazione del calcestruzzo (19 m/s^2). Anche in considerazione del potenziale notevole contributo di questa lavorazione all'esposizione complessiva, si decide pertanto di eseguire misure. Riguardo al tempo di esposizione, si dispone semplicemente di una stima minima e di una stima massima pari rispettivamente a 45 e 75 minuti.

La **lavorazione 4** consiste nella foratura di laterizi. Per tale operazione viene utilizzato un trapano Black & Decker modello KD 960. La BDV non contiene misure in campo

relative a questo utensile. Il fabbricante dichiara un valore totale di vibrazione di $4,62 \text{ m/s}^2$ senza alcuna indicazione relativa all'incertezza. Lo strumento è stato commercializzato nei primi anni 2000 quindi la dichiarazione del fabbricante è da intendersi relativa alla vecchia direttiva macchine. Il fattore di correzione $F^{corr} = 1,5$ è quello riportato dalla norma UNI CEN/TR 15350 per i trapani. Riguardo al tempo di esposizione, in questo caso sono state ottenute tre stime indipendenti, pari rispettivamente a 60, 75 e 90 minuti.

H.2.2 Calcolo dell'esposizione

La Tabella 18 mostra per ciascuna delle quattro lavorazioni:

- colonna 1) - l'indice sequenziale della lavorazione;
- colonna 2) - il dettaglio della lavorazione eseguita;
- colonna 3) - la tipologia di utensile utilizzato;
- colonna 4) - la marca ed il modello dell'utensile;
- colonna 5) - il percorso seguito per ottenere il valore dell'accelerazione.

Tabella 18		Lavorazioni eseguite e utensili		
Indice	Lavorazione	Tipologia di utensile	Marca - Modello	Percorso
1	Perforazione cemento	Martello perforatore	Milwaukee - PHE 40SQ	BDV
2	Levigatura	Smerigliatrice	DeWalt - DWE 4559	Fabbricante
3	Demolizione calcestruzzo	Martello perforatore	DeWalt - D25600K	Misura
4	Foratura laterizi	Trapano	Black & Decker - KD 960	Fabbricante

- colonna 1) - l'indice sequenziale della lavorazione;
- colonna 2) - il dettaglio della lavorazione eseguita;
- colonna 3) - la marca ed il modello dell'utensile;
- colonne 4 - 9) - le tre accelerazioni assiali (se disponibili) e le relative incertezze.

La Tabella 19 mostra per ciascuna delle quattro lavorazioni:

Tabella 19		Accelerazioni e tempi di esposizione per le diverse lavorazioni eseguite						
Indice	Lavorazione	Marca - Modello	a_{hwX} (m/s^2)	$u(a_{hwX})$ (m/s^2)	a_{hwY} (m/s^2)	$u(a_{hwY})$ (m/s^2)	a_{hwZ} (m/s^2)	$u(a_{hwZ})$ (m/s^2)
1	Perforazione cemento	Milwaukee - PHE 40SQ	12,5	0,05	7,8	0,14	3,4	0,05
2	Levigatura	DeWalt - DWE 4559	-----	-----	-----	-----	-----	-----
3	Demolizione calcestruzzo	DeWalt - D25600K	8,87	0,55	4,32	0,22	4,61	0,23
4	Foratura laterizi	Black & Decker - KD 960	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabella 20 Accelerazioni e tempi di esposizione per le diverse lavorazioni eseguite

Indice	Lavorazione	Marca - Modello	a_{hv} (m/s^2)	$u(a_{hv})$ (m/s^2)	T_e (minuti)	$u(T_e)$ (minuti)	$A(8)_i$ (m/s^2)
1	Perforazione cemento	Milwaukee - PHE 40SQ	15,1	2,8	30	10	3,8
2	Levigatura	DeWalt - DWE 4559	10,5	1,3	30	10	2,6
3	Demolizione calcestruzzo	DeWalt - D25600K	10,9	0,6	60	15	3,9
4	Foratura laterizi	Black & Decker - KD 960	6,9	1,7	75	9	2,7

La Tabella 20 mostra per ciascuna delle quattro lavorazioni:

- colonna 1) - l'indice sequenziale della lavorazione;
- colonna 2) - il dettaglio della lavorazione eseguita;
- colonna 3) - la marca ed il modello dell'utensile;
- colonne 4 e 5) - il valore totale di vibrazione e la relativa incertezza;
- colonne 6 e 7) - il tempo di esposizione e la relativa incertezza;
- colonna 8) - il contributo parziale all'esposizione $A(8)$.

L'esposizione giornaliera alle vibrazioni $A(8)$ risulta pari a:

$$A(8) = \sqrt{\sum_{i=1}^4 A(8)_i^2} = \sqrt{A(8)_1^2 + A(8)_2^2 + A(8)_3^2 + A(8)_4^2} = \sqrt{3,8^2 + 1,75^2 + 3,9^2 + 2,7^2} = 6,3 \text{ m/s}^2$$

con un'incertezza $u(A(8)) = 0,79 \text{ m/s}^2$.

L'esposizione giornaliera alle vibrazioni risulta superiore al valore limite di esposizione di 5 m/s^2 . È dunque necessario mettere in opera le indicazioni riportate nella terza fascia (rossa) della Tabella 4. Successivamente, il DL dovrà provvedere alla rivalutazione del rischio verificando l'effettiva riduzione dell'esposizione del lavoratore, a seguito delle misure attuate.

L'esposizione su periodi brevi è pari al più alto dei valori stimati per i diversi utensili. Poiché l'utensile con la vibrazione più elevata è l'utensile 1, la cui vibrazione è stata quantificata mediante la BDV, seguendo le indicazioni fornite al punto 2.8.1 l'esposizione su periodi brevi viene stimata pari al valore medio + una deviazione standard da ripetibilità, come riportata nella BDV. Il valore così ottenuto è pari a $15,3 \text{ m/s}^2$, e risulta pertanto inferiore al pertinente valore limite di 20 m/s^2 .

H.3 WBV - ESPOSIZIONE DOVUTA AD UNA SOLA LAVORAZIONE

L'esposizione alle WBV di un lavoratore è dovuta esclusivamente ad una attività di scavo. Per tale attività viene utilizzato un escavatore Komatsu, modello PC 240-6. La

BDV non contiene dati su questo macchinario. Nessun valore di vibrazione compare neppure nella dichiarazione del fabbricante. Si procede pertanto all'esecuzione di misure. La Tabella 21 mostra, per ciascuna delle misure eseguite:

- colonna 1) - l'indice sequenziale della misura;
- colonne 2) - 4) le tre accelerazioni ponderate assiali;
- colonna 5) - il tempo di misura (non inferiore a 240 secondi, vedi punto 2.6.4).

Tabella 21		Dettaglio delle misure eseguite			
Misura	a_{wx} (m/s^2)	a_{wy} (m/s^2)	a_{wz} (m/s^2)	T_m (s)	
1	0,58	0,28	0,38	242,2	
2	0,49	0,30	0,46	265,6	
3	0,52	0,37	0,36	282,0	

L'accelerazione media viene calcolata per ciascun asse eseguendo la radice quadrata della somma dei quadrati dei risultati ottenuti nelle singole misure, pesati dai relativi tempi di misura. ~~L'incertezza da ripetibilità si deriva invece a partire dalla media lineare~~ ed è dunque totalmente trascurabile.

L'incertezza da ripetibilità, associata alla pura fluttuazione evidenziata dalle tre misure (vedi appendice F). La differenza fra la media aritmetica e la media quadratica è sempre combinata con gli altri contributi illustrati al punto F.2.3 per ottenere il valore complessivo dell'incertezza da campionamento. Quest'ultima viene poi a sua volta combinata con l'incertezza da posizionamento u_p e l'incertezza da vibrazione di a

La Tabella 22 mostra per ciascuna delle tre direzioni (x, y, z) dell'accelerazione:

- riga 1) - la media quadratica;
- riga 2) - la media lineare;
- riga 3) - l'incertezza da ripetibilità;
- riga 4) - l'incertezza da campionamento;
- riga 5) - l'incertezza complessiva.

Tabella 22		Valori medi e incertezze		
	x	y	z	
Media quadratica a_{wq}	0,53	0,32	0,40	
Media lineare a_{wl-lin}	0,53	0,32	0,40	
Incetenza da ripetibilità $u_R(a_{wq})$	0,03	0,03	0,03	
Incetenza da campionamento $u_C(a_{wq})$	0,03	0,03	0,03	
Incetenza complessiva $u(a_{wq})$	0,06	0,04	0,05	

Accanto ai valori medi delle tre accelerazioni assiali, viene calcolato anche il valore totale di vibrazione $a_v = 0,96 \text{ m/s}^2$, al quale risulta associata un'incertezza $u(a_v) = 0,09 \text{ m/s}^2$.

Riguardo al tempo di esposizione è stato possibile ottenere tre stime pari rispettivamente a 150, 180 e 240 minuti. Si ottiene pertanto un valore medio del tempo di esposizione $T_e = 190$ minuti con un'associata incertezza $u(T_e) = 26,5$ minuti.

L'esposizione quotidiana alle vibrazioni $A(8)$ va calcolata sia per le tre accelerazioni assiali sia per il valore totale di vibrazione. I risultati che si ottengono sono i seguenti:

$$A(8)_x = k_x a_x \sqrt{\frac{T_e}{T_0}} = 1,4 \times 0,53 \sqrt{\frac{190}{480}} = 0,47 \text{ m/s}^2$$

$$A(8)_y = k_y a_y \sqrt{\frac{T_e}{T_0}} = 1,4 \times 0,32 \sqrt{\frac{190}{480}} = 0,28 \text{ m/s}^2$$

$$A(8)_z = k_z a_z \sqrt{\frac{T_e}{T_0}} = 1,0 \times 0,40 \sqrt{\frac{190}{480}} = 0,25 \text{ m/s}^2$$

$$A(8)_v = a_v \sqrt{\frac{T_e}{T_0}} = 0,96 \sqrt{\frac{190}{480}} = 0,60 \text{ m/s}^2$$

Per nessuno dei tre assi la disuguaglianza $A(8)_x > 0,8 \times A(8)_v$ risulta soddisfatta. Pertanto il descrittore della vibrazione è l'esposizione giornaliera basata sul valore totale di vibrazione, $A(8) = 0,60 \text{ m/s}^2$, al quale risulta associata un'incertezza $u(A(8)) = 0,07 \text{ m/s}^2$ prevalentemente dovuta all'incertezza strumentale.

L'esposizione giornaliera alle vibrazioni risulta compresa fra il valore di azione di $0,5 \text{ m/s}^2$ e il valore limite di esposizione di 1 m/s^2 . È necessario pertanto redigere ed attuare un piano di riduzione del rischio, e mettere in opera le altre indicazioni riportate nella seconda fascia (gialla) della Tabella 4. Successivamente, il DL dovrà provvedere alla rivalutazione del rischio verificando l'effettiva riduzione dell'esposizione del lavoratore, a seguito delle misure attuate.

L'esposizione su periodi brevi è pari al valore di accelerazione assiale misurato in corrispondenza della situazione espositiva peggiore, ovvero $0,98 \text{ m/s}^2$, e risulta pertanto inferiore al pertinente valore limite di $1,5 \text{ m/s}^2$.

H.4 WBV - ESPOSIZIONE DOVUTA A DIVERSE LAVORAZIONI

H.4.1 Dettaglio delle lavorazioni

L'esposizione alle WBV di un lavoratore è il risultato di tre diverse lavorazioni.

La **lavorazione 1** consiste nel carico di materiali su un autocarro. Per tale operazione viene utilizzato un carrello elevatore a forca Jugheinrich ETV Q20. La vibrazione di questo utensile non è riportata nella BDV. Il fabbricante dichiara un'accelerazione di $0,66 \text{ m/s}^2$ relativa al solo asse verticale (z), senza alcuna dichiarazione di incertezza. La dichiarazione risulta relativa alla nuova direttiva macchine. Riguardo al tempo di esposizione, si dispone semplicemente di una stima minima e di una stima massima pari rispettivamente a 45 e 60 minuti.

La **lavorazione 2** consiste della guida dell'autocarro caricato nella precedente fase. Per tale operazione viene utilizzato un autocarro con cassone ribaltabile Mercedes Benz 2638 SK. La vibrazione di questo utensile è riportata nella BDV per l'operazione di movimentazione materiali. Si utilizzano pertanto i valori di accelerazione assiale ivi riportati, $a_{wx} = 0,1 \text{ m/s}^2$, $a_{wy} = 0,2 \text{ m/s}^2$, $a_{wz} = 0,6 \text{ m/s}^2$. Riguardo al tempo di esposizione, si dispone semplicemente di una stima minima e di una stima massima pari rispettivamente a 300 e 360 minuti.

La **lavorazione 3** consiste nella movimentazione di materiali. Per tale operazione viene utilizzato un'autogru Belotti B 81. La BDV non contiene misure in campo relative a questo macchinario. Non è stato possibile reperire alcuna informazione fornita dal fabbricante. Si procede pertanto all'esecuzione di misure. Riguardo al tempo di esposizione, si dispone semplicemente di una stima minima e di una stima massima pari rispettivamente a 60 e 90 minuti.

H.4.2 Calcolo dell'esposizione

La Tabella 23 mostra per ciascuna delle quattro lavorazioni:

- colonna 1) - l'indice sequenziale della lavorazione;
- colonna 2) - il dettaglio della lavorazione eseguita;
- colonna 3) - la tipologia di macchinario utilizzato;
- colonna 4) - la marca ed il modello del macchinario;
- colonna 5) - il percorso seguito per ottenere il valore di accelerazione.

Tabella 23 Lavorazioni eseguite e macchinari				
Indice	Lavorazione	Tipologia di macchinario	Marca - Modello	Percorso
1	Carico materiali	Carrello elevatore	Jungheinrich – ETV Q20	Fabbricante
2	Guida	Autocarro	Mercedes – 2638 SK	Banca Dati
3	Movimentazione materiali	Autogru	Belotti – B81	Misure

La Tabella 24 mostra per ciascuna delle tre lavorazioni:

- colonna 1) - l'indice sequenziale della lavorazione;
- colonna 2) - il dettaglio della lavorazione eseguita;
- colonna 3) - la marca ed il modello del macchinario;
- colonne 4 - 6) - le tre accelerazioni assiali;
- colonna 7) - il valore totale di vibrazione.

Tabella 24 Accelerazioni e tempi di esposizione per le diverse lavorazioni eseguite							
Indice	Lavorazione	Marca - Modello	a_x (m/s^2)	a_y (m/s^2)	a_z (m/s^2)	a_v (m/s^2)	T_e (minuti)
1	Carico materiali	Jungheinrich – ETV Q20	-----	-----	0,66	0,66	52,5
2	Guida	Mercedes – 2638 SK	0,1	0,2	0,6	0,6	330
3	Movimentazione materiali	Belotti – B81	0,2	0,2	0,4	0,6	75

La successiva Tabella 25 mostra le incertezze associate ai valori della Tabella 24. Infine la Tabella 26 mostra le esposizioni parziali dovute alle singole attività, e l'esposizione totale, relative sia a ciascuno dei tre assi sia al valore totale di vibrazione.

Tabella 25 Incertezze sulle accelerazioni e sui tempi di esposizione							
Indice	Lavorazione	Marca - Modello	$u(a_{wx})$ (m/s^2)	$u(a_{wy})$ (m/s^2)	$u(a_{wz})$ (m/s^2)	$u(a_v)$ (m/s^2)	$u(T_e)$ (minuti)
1	Carico materiali	Jungheinrich – ETV Q20	-----	-----	0,09	0,09	7,5
2	Guida	Mercedes – 2638 SK	0,02	0,05	0,12	0,16	30
3	Movimentazione materiali	Belotti – B81	0,03	0,01	0,03	0,03	15

Indice	Lavorazione	Marca - Modello	A(8) _x (m/s ²)	A(8) _y (m/s ²)	A(8) _z (m/s ²)	A(8) _v (m/s ²)
1	Carico materiali	Jungheinrich – ETV Q20	-----	-----	0,22	0,22
2	Guida	Mercedes – 2638 SK	0,12	0,23	0,50	0,53
3	Movimentazione materiali	Belotti – B81	0,13	0,11	0,15	0,22
Totale			0,17	0,25	0,52	0,64

La disequaglianza $A(8)_x > 0,8 A(8)_v$ risulta soddisfatta per l'asse z, che viene di conseguenza identificato come asse dominante. Pertanto il descrittore della vibrazione è l'esposizione giornaliera monoassiale $A(8)_z$.

$$A(8) = 0,52 \text{ m/s}^2$$

al quale risulta associata un'incertezza $u(A(8)) = 0,11 \text{ m/s}^2$, prevalentemente dovuta all'incertezza strumentale. L'esposizione giornaliera alle vibrazioni risulta compresa fra il valore di azione di $0,5 \text{ m/s}^2$ e il valore limite di esposizione di 1 m/s^2 . È necessario pertanto redigere ed attuare un piano di riduzione del rischio, e mettere in opera le altre indicazioni riportate nella seconda fascia (gialla) della Tabella 6. Successivamente, il datore di lavoro dovrà provvedere alla rivalutazione del rischio verificando l'effettiva riduzione dell'esposizione del lavoratore, a seguito delle misure attuate.

L'esposizione su periodi brevi è pari al valore di accelerazione assiale misurato in corrispondenza della situazione espositiva peggiore, che nella fattispecie si verifica per la guida del camion. Il valore che si ottiene sommando il valore medio e la deviazione standard da ripetibilità dedotta dalle informazioni contenute nella BDV è $0,84 \text{ m/s}^2$, e risulta pertanto inferiore al pertinente valore limite di $1,5 \text{ m/s}^2$.

H.5 WBV - ESPOSIZIONE A VIBRAZIONI IMPULSIVE

L'esposizione alle WBV considerata nell'esempio precedente consiste di tre lavorazioni, due delle quali (la prima e la seconda) caratterizzate da notevoli componenti impulsive. Si decide pertanto di ripetere il calcolo dell'esposizione, utilizzando stavolta il metodo della dose alla quarta potenza, ovvero adottando come descrittore di esposizione la quantità VDV.

Si eseguono misure indipendenti di VDV per le tre fasi lavorative. La Tabella 27 sintetizza, per ciascuna delle tre fasi, la lavorazione eseguita, il tempo di esposizione, il tempo di misura, e i valori di VDV misurati sui tre assi.

Tabella 27 Tempi di esposizione e valori di VDV misurati per le tre lavorazioni

Lavorazione	T_e (minuti)	T_{mis} (minuti)	$VDV_x(T_{mis})$ ($m/s^{1,75}$)	$VDV_y(T_{mis})$ ($m/s^{1,75}$)	$VDV_z(T_{mis})$ ($m/s^{1,75}$)
Carico materiali	52,5	20	2,20	2,07	4,11
Guida	330	20	2,05	2,55	5,47
Sollevamento materiali	75	20	2,53	2,71	3,60

La Tabella 28 riporta nelle prime tre righe i valori assiali VDV relativi al tempo di esposizione T_e per ciascuna lavorazione. Nell'ultima riga essa riporta poi i tre valori assiali relativi all'intera esposizione giornaliera, comprensivi degli opportuni pesi assiali k_i .

Tabella 28 Valori di VDV relativi all'intera esposizione

Lavorazione	$VDV_x(T_e)$ ($m/s^{1,75}$)	$VDV_y(T_e)$ ($m/s^{1,75}$)	$VDV_z(T_e)$ ($m/s^{1,75}$)
Carico materiali	2,8	2,6	5,2
Guida	4,1	5,1	11,0
Sollevamento materiali	3,5	3,8	5,0
Totale	6,6	7,8	11,3

Il VDV da utilizzare per la valutazione del rischio è il più alto di tali valori assiali, ovvero quello relativo all'asse z, $VDV = 11,3 m/s^{1,75}$. L'incertezza associata a tale valore, calcolata come dettagliato nell'appendice F.9, vale $u(VDV) = 0,96 m/s^{1,75}$.

La valutazione dell'esposizione giornaliera alle vibrazioni mediante l'indice VDV fornisce un'indicazione coerente con la valutazione basata sull'indice A(8). Il valore di VDV risulta infatti compreso fra il valore di azione di $9,1 m/s^2$ e il valore limite di esposizione di $21 m/s^2$ contenuti nella direttiva 2002/44/CE. Non sono pertanto necessarie ulteriori azioni aggiuntive rispetto a quelle già previste per la fascia di rischio intermedia (gialla) della Tabella 6.

