

# 50

Director del capítulo  
*Michael J. Griffin*

## Sumario

Vibraciones <i>Michael J. Griffin</i> .....	50.2
Vibraciones de cuerpo completo <i>Helmut Seidel y Michael J. Griffin</i> .....	50.3
Vibraciones transmitidas a las manos <i>Massimo Bovenzi</i> .....	50.8
Mareo inducido por el movimiento <i>Alan J. Benson</i> .....	50.14

## ● VIBRACIONES

*Michael J. Griffin*

La vibración es un movimiento oscilatorio. Este capítulo resume las respuestas humanas a las vibraciones de cuerpo completo, las transmitidas a las manos y las causas del mareo, incluido por el movimiento.

*Las vibraciones del cuerpo completo* ocurren cuando el cuerpo está apoyado en una superficie vibrante (por ejemplo, cuando se está sentado en un asiento que vibra, de pie sobre un suelo vibrante o recostado sobre una superficie vibrante). Las vibraciones de cuerpo completo se presentan en todas las formas de transporte y cuando se trabaja cerca de maquinaria industrial.

*Las vibraciones transmitidas a las manos* son las vibraciones que entran en el cuerpo a través de las manos. Están causadas por distintos procesos de la industria, la agricultura, la minería y la construcción, en los que se agarran o empujan herramientas o piezas vibrantes con las manos o los dedos. La exposición a las vibraciones transmitidas a las manos puede provocar diversos trastornos.

*El mareo* inducido por el movimiento puede ser producido por oscilaciones del cuerpo de bajas frecuencias, por algunos tipos de rotación del cuerpo y por el movimiento de señales luminosas con respecto al cuerpo.

### Magnitud

Los desplazamientos oscilatorios de un objeto implican, alternativamente, una velocidad en una dirección y después una velocidad en dirección opuesta. Este cambio de velocidad significa que el objeto experimenta una aceleración constante, primero en una dirección y después en dirección opuesta. La magnitud de una vibración puede cuantificarse en función de su desplazamiento, su velocidad o su aceleración. A efectos prácticos, la aceleración suele medirse con acelerómetros. La unidad de aceleración es el metro por segundo al cuadrado ( $m/s^2$ ). La aceleración debida a la gravedad terrestre es, aproximadamente, de  $9,81 m/s^2$ .

La magnitud de una oscilación puede expresarse como la distancia entre los extremos alcanzados por el movimiento (valor pico-pico) o como la distancia desde algún punto central hasta la desviación máxima (valor pico). Con frecuencia, la magnitud de la vibración se expresa como el valor promedio de la aceleración del movimiento oscilatorio, normalmente el valor cuadrático medio o valor eficaz ( $m/s^2$  r.m.s.). Para un movimiento de una sola frecuencia (senoidal), el valor eficaz es el valor pico dividido por  $\sqrt{2}$ .

Para un movimiento senoidal, la aceleración,  $a$  (en  $m/s^2$ ), puede calcularse a partir de la frecuencia,  $f$  (en ciclos por segundo), y el desplazamiento,  $d$  (en metros):

$$a = (2\pi f)^2 d$$

Puede usarse esta expresión para convertir medidas de aceleración en desplazamientos, pero solo tiene precisión cuando el movimiento se produce a una sola frecuencia.

A veces se utilizan escalas logarítmicas para cuantificar magnitudes de vibración en decibelios. Cuando se utiliza el nivel de referencia de la Norma Internacional 1683, el nivel de aceleración,  $L_a$ , viene dado por la expresión  $L_a = 20 \log_{10}(a/a_0)$ , en donde  $a$  es la aceleración medida (en  $m/s^2$  r.m.s.) y  $a_0$  el nivel de referencia de  $10^{-6} m/s^2$ . En algunos países se utilizan otros niveles de referencia.

### Frecuencia

La frecuencia de vibración, que se expresa en ciclos por segundo (hertzios, Hz), afecta a la extensión con que se transmiten las vibraciones al cuerpo (p. ej., a la superficie de un asiento o a la

empuñadura de una herramienta vibrante), a la extensión con que se transmiten a través del cuerpo (p. ej., desde el asiento a la cabeza) y al efecto de las vibraciones en el cuerpo. La relación entre el desplazamiento y la aceleración de un movimiento depende también de la frecuencia de oscilación: un desplazamiento de un milímetro corresponde a una aceleración muy pequeña a bajas frecuencias, pero a una aceleración muy grande a frecuencias altas; el desplazamiento de la vibración visible al ojo humano no proporciona una buena indicación de la aceleración de las vibraciones.

Los efectos de las vibraciones de cuerpo completo suelen ser máximos en el límite inferior del intervalo de frecuencias, de 0,5 a 100 Hz. En el caso de las vibraciones transmitidas a las manos, las frecuencias del orden de 1.000 Hz o superiores pueden tener efectos perjudiciales. Las frecuencias inferiores a unos 0,5 Hz pueden causar mareo inducido por el movimiento.

El contenido de frecuencia de la vibración puede verse en los espectros. En muchos tipos de vibraciones de cuerpo completo y de vibraciones transmitidas a las manos, los espectros son complejos, produciéndose algo de movimiento a todas las frecuencias. Sin embargo, suele haber picos a las frecuencias que se presentan en la mayor parte de las vibraciones.

Dado que la respuesta humana a las vibraciones varía según la frecuencia de vibración, es necesario ponderar la vibración medida en función de cuánta vibración se produce a cada una de las frecuencias. Las ponderaciones en frecuencia reflejan la medida en que las vibraciones causan el efecto indeseado a cada frecuencia. Es necesario realizar ponderaciones para cada eje de vibración. Se requieren ponderaciones en frecuencia diferentes para las vibraciones de cuerpo completo, las vibraciones transmitidas a las manos y el mareo inducido por el movimiento.

### Dirección

Las vibraciones pueden producirse en tres direcciones lineales y tres rotacionales. En el caso de personas sentadas, los ejes lineales se designan como eje  $x$  (longitudinal), eje  $y$  (lateral) y eje  $z$  (vertical). Las rotaciones alrededor de los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$  se designan como  $r_x$  (balanceo),  $r_y$  (cabeceo) y  $r_z$  (deriva), respectivamente. Las vibraciones suelen medirse en la interfase entre el cuerpo y las vibraciones. Los sistemas principales de coordenadas para medir las vibraciones de cuerpo completo y las vibraciones transmitidas a las manos se exponen en los dos artículos siguientes del capítulo.

### Duración

La respuesta humanas a las vibraciones depende de la duración total de la exposición a las vibraciones. Si las características de la vibración no varían en el tiempo, el valor eficaz de la vibración proporciona una medida adecuada de su magnitud promedio. En tal caso un cronómetro puede ser suficiente para evaluar la duración de la exposición. La intensidad de la magnitud promedio y la duración total pueden evaluarse según las normas expuestas en los siguientes artículos.

Si varían las características de la vibración, la vibración promedio medida dependerá del período durante el que se mida. Además, se cree que la aceleración eficaz infravalora la intensidad de los movimientos que contienen choques o son marcadamente intermitentes.

Muchas exposiciones profesionales son intermitentes, tienen una magnitud variable en cada momento o contienen choques esporádicos. La intensidad de tales movimientos complejos pueden acumularse de manera que dé un peso apropiado a, por ejemplo, períodos cortos de vibración de alta magnitud y períodos largos de vibración de baja magnitud. Para el cálculo de las dosis se utilizan diferentes métodos (véase "Vibraciones de

cuerpo completo”; “Vibraciones transmitidas a las manos”, y “Mareo inducido por el movimiento” en este capítulo).

## ● VIBRACIONES DE CUERPO COMPLETO

*Helmut Seidel y Michael J. Griffin*

### Exposición profesional

Las exposiciones profesionales a las vibraciones de cuerpo completo se dan, principalmente, en el transporte, pero también en algunos procesos industriales. El transporte terrestre, marítimo y aéreo puede producir vibraciones que pueden causar malestar, interferir con las actividades u ocasionar lesiones. En la Tabla 50.1 se ofrece una relación de algunos ambientes que pueden entrañar gran probabilidad de riesgo para la salud.

La exposición más común a vibraciones y choques fuertes suele darse en vehículos todo terreno, incluyendo maquinaria de movimiento de tierras, camiones industriales y tractores agrícolas.

### Biodinámica

Como todas las estructuras mecánicas, el cuerpo humano tiene frecuencias de resonancia a las que presenta una respuesta mecánica máxima. La explicación de las respuestas humanas a las vibraciones no puede basarse exclusivamente en una sola frecuencia de resonancia. Hay muchas resonancias en el cuerpo, y las frecuencias de resonancia varían de unas personas a otras y en función de la postura. Para describir el modo en que la vibración produce movimiento en el cuerpo suelen utilizarse dos respuestas mecánicas: *transmisibilidad* e *impedancia*.

Tabla 50.1 • Actividades para las que puede ser conveniente alertar sobre los efectos desfavorables de la vibración de cuerpo completo.

Conducción de tractores

Vehículos de combate blindados (p. ej., tanques) y otros similares

Otros vehículos todoterreno:

- Maquinaria de movimiento de tierras: cargadoras, excavadoras, bulldozers, motoniveladoras, cucharas de arrastre, volquetes, rodillos compactadores
- Máquinas forestales
- Maquinaria de minas y canteras
- Carretillas elevadoras

Conducción de algunos camiones (articulados y no articulados)

Conducción de algunos autobuses y tranvías

Vuelo en algunos helicópteros y aeronaves de alas rígidas

Algunos trabajadores que utilizan maquinaria de fabricación de hormigón

Algunos conductores ferroviarios

Uso de algunas embarcaciones de alta velocidad

Conducción de algunos ciclomotores

Conducción de algunos turismos y furgonetas

Algunas actividades deportivas

Algunos otros tipos de maquinaria industrial

Fuente: Adaptado de Griffin 1990.

La transmisibilidad indica qué fracción de la vibración se transmite, por ejemplo, desde el asiento a la cabeza. La transmisibilidad del cuerpo depende en gran medida de la frecuencia de vibración, el eje de vibración y la postura del cuerpo. La vibración vertical de un asiento causa vibraciones en varios ejes en la cabeza; en el caso del movimiento vertical de la cabeza, la transmisibilidad suele alcanzar su máximo valor en el intervalo de 3 a 10 Hz.

La impedancia mecánica del cuerpo indica la fuerza que se requiere para que el cuerpo se mueva a cada frecuencia. Aunque la impedancia depende de la masa corporal, la impedancia vertical del cuerpo humano suele presentar resonancia en torno a los 5 Hz. La impedancia mecánica del cuerpo, incluyendo esta resonancia, incide considerablemente en la forma en que se transmite la vibración a través de los asientos.

### Efectos agudos

#### *Malestar*

El malestar causado por la aceleración de la vibración depende de la frecuencia de vibración, la dirección de la vibración, el punto de contacto con el cuerpo y la duración de la exposición a la vibración. En la vibración vertical de personas sentadas, el malestar causado por la vibración vertical a cualquier frecuencia aumenta en proporción a la magnitud de la vibración: si se reduce ésta a la mitad, el malestar tenderá a reducirse a la mitad.

Puede predecirse el malestar que producirá las vibraciones utilizando ponderaciones en frecuencia adecuadas (véase abajo) y describirse mediante una escala semántica de malestar. No existen límites prácticos en cuanto al malestar causado por las vibraciones: el malestar tolerable varía de unos ambientes a otros.

Las magnitudes tolerables de vibraciones en edificios están próximas a los umbrales de percepción de la vibración. Se supone que los efectos de las vibraciones en edificios sobre los humanos dependen del uso del edificio, además de la frecuencia, dirección y duración de las vibraciones. Directrices para la evaluación de las vibraciones en edificios se dan en diversas normas, tales como la Norma Británica 6472 (1992), que define un procedimiento para la evaluación de las vibraciones y los choques en los edificios.

#### *Interferencia con la actividad*

Las vibraciones pueden deteriorar la adquisición de información (p. ej., por los ojos), la salida de información (p. ej., mediante movimientos de las manos o de los pies) o los procesos centrales complejos que relacionan la entrada con la salida (p. ej., aprendizaje, memoria, toma de decisiones). Los mayores efectos de las vibraciones de cuerpo completo se producen en los procesos de entrada (principalmente la visión) y en los de salida (principalmente el control continuo de las manos).

Los efectos de las vibraciones sobre la visión y el control manual están causados principalmente por el movimiento de la parte del cuerpo afectada (es decir, el ojo o la mano). Dichos efectos pueden aminorarse reduciendo la transmisión de vibraciones al ojo o a la mano, o haciendo que la tarea esté menos sujeta a alteraciones (p. ej., aumentando el tamaño de una pantalla o reduciendo la sensibilidad de un mando). Con frecuencia, los efectos de las vibraciones sobre la visión y el control manual pueden reducirse considerablemente diseñando de nuevo la tarea.

Según parece, a las tareas cognitivas simples (p. ej., el tiempo de reacción simple) no les afectan las vibraciones, a diferencia de lo que ocurre con los cambios de excitación o motivación o con los efectos directos en los procesos de entrada y salida de información. Lo mismo puede ocurrir con algunas tareas cognitivas

complejas. Sin embargo, la escasez y diversidad de los estudios experimentales no excluye la posibilidad de efectos cognitivos reales y significativos de las vibraciones. Las vibraciones pueden influir en la fatiga, pero hay poca evidencia científica relevante y ninguna que apoye la forma compleja del "límite de la capacidad reducida por fatiga" propuesto en la Norma Internacional 2631 (ISO 1974, 1985).

### **Alteraciones de las funciones fisiológicas**

Las alteraciones en las funciones fisiológicas se producen cuando los sujetos están expuestos a un ambiente de vibraciones de cuerpo completo en condiciones de laboratorio. Las alteraciones típicas de una "respuesta de sobresalto" (p. ej., aumento de la frecuencia cardíaca) se normalizan rápidamente con la exposición continuada, mientras que otras reacciones continúan o se desarrollan de modo gradual. El último aspecto puede depender de todas las características de las vibraciones, incluyendo el eje, la magnitud de la aceleración y la clase de vibración (senoidal o aleatoria), así como de otras variables tales como el ritmo circadiano y las características de los sujetos (véase Hasan 1970; Seidel 1975; Dupuis y Zerlett 1986). Con frecuencia no es posible relacionar directamente las alteraciones de las funciones fisiológicas en condiciones de campo con las vibraciones, dado que ésta suele actuar conjuntamente con otros factores significativos, como la elevada tensión mental, el ruido y las sustancias tóxicas. Las alteraciones fisiológicas son frecuentemente menos sensibles que las reacciones psicológicas (p. ej., el malestar). Si todos los datos disponibles sobre las alteraciones fisiológicas persistentes se resumen respecto a su primera aparición significativa, dependiendo de la magnitud y frecuencia de las vibraciones de cuerpo completo, hay un umbral con un límite inferior en torno a un valor eficaz de  $0,7 \text{ m/s}^2$  entre 1 y 10 Hz, que aumenta hasta un valor eficaz de  $30 \text{ m/s}^2$  a 100 Hz. Se han realizado numerosos estudios con animales, pero su relevancia para los humanos es dudosa.

### **Alteraciones neuromusculares**

Durante el movimiento natural activo, los mecanismos de control motor actúan como un control de información de ida constantemente ajustado por la retroinformación adicional procedente de los sensores situados en los músculos, tendones y articulaciones. Las vibraciones de cuerpo completo producen un movimiento artificial pasivo del cuerpo humano, condición que difiere esencialmente de las vibraciones autoinducidas por la locomoción. La ausencia de control de información durante las vibraciones de cuerpo completo es la alteración más clara de la función fisiológica normal del sistema neuromuscular. La gama de frecuencias más amplia asociada con las vibraciones de cuerpo completo (entre 0,5 y 100 Hz), comparada con la del movimiento natural (entre 2 y 8 Hz para los movimientos voluntarios, e inferior a 4 Hz para la locomoción) es otra diferencia más que ayuda a explicar las reacciones de los mecanismos de control neuromuscular a frecuencias muy bajas y a altas frecuencias.

Las vibraciones de cuerpo completo y la aceleración transitoria determinan una actividad alternante relacionada con la aceleración en el electromiograma (EMG) de los músculos superficiales de la espalda de personas sentadas que obliga a mantener una contracción tónica. Se supone que esta actividad es de naturaleza refleja. Normalmente, desaparece por completo si los sujetos sometidos a vibraciones permanecen sentados y relajados en posición encorvada. La temporización de la actividad muscular depende de la frecuencia y magnitud de la aceleración. Los datos electromiográficos sugieren que la columna puede verse sometida a una carga mayor debido a la reducción de la estabilización muscular de la misma a frecuencias de 6,5 a 8 Hz y durante la fase inicial a un desplazamiento brusco hacia

arriba. A pesar de la débil actividad EMG causada por las vibraciones de cuerpo completo, la fatiga de los músculos de la espalda durante la exposición a las vibraciones puede ser superior a la que se observa en posturas sentadas normales sin vibraciones de cuerpo completo.

Los reflejos de los tendones pueden disminuir o desaparecer temporalmente durante la exposición a las vibraciones de cuerpo completo a frecuencias superiores a 10 Hz. Las pequeñas alteraciones del control postural tras la exposición a las vibraciones de cuerpo completo son muy variables, y sus mecanismos e importancia práctica no son bien conocidos.

### **Alteraciones cardiovasculares, respiratorias, endocrinas y metabólicas**

Se han comparado las alteraciones observadas que persisten durante la exposición a las vibraciones con las que se producen durante el trabajo físico moderado (es decir, aumentos de la frecuencia cardíaca, presión arterial y consumo de oxígeno), incluso a una magnitud de vibración cercana al límite de tolerancia voluntaria. El aumento de ventilación obedece en parte a oscilaciones del aire en el sistema respiratorio. Las alteraciones respiratorias y metabólicas pueden no corresponderse, lo que posiblemente sugiere una perturbación de los mecanismos de control de la respiración. Se han comunicado diversos hallazgos, en parte contradictorios, sobre alteraciones de las hormonas adrenocorticotrópicas (ACTH) y las catecolaminas.

### **Alteraciones sensoriales y del sistema nervioso central**

Se ha sostenido la existencia de alteraciones de la función vestibular debidas a las vibraciones de cuerpo completo sobre la base de una afectación de la regulación de la postura, a pesar de que ésta es controlada por un sistema muy complejo donde la perturbación de la función vestibular puede ser compensada ampliamente por otros mecanismos. Las alteraciones de la función vestibular parecen revestir mayor entidad en las exposiciones a frecuencias muy bajas o próximas a la resonancia de cuerpo completo. Se supone que una discordancia sensorial entre la información vestibular, visual y propioceptiva (estímulos recibidos en el interior de los tejidos) es un mecanismo importante que explica las respuestas fisiológicas a algunos entornos de movimiento artificial.

Los experimentos con exposición combinada, a corto plazo y prolongada, a ruido y vibraciones de cuerpo completo, parecen sugerir que las vibraciones tienen un pequeño efecto sinérgico sobre la audición. Como tendencia, se observaba que altas intensidades de vibraciones de cuerpo completo a 4 o 5 Hz se asociaban a mayores desplazamientos temporales del umbral (TTS) adicionales. No hubo ninguna relación evidente entre los TTS adicionales y el tiempo de exposición. Los TTS adicionales parecían aumentar al aplicar dosis mayores de vibraciones de cuerpo completo.

Las vibraciones verticales y horizontales impulsivas evocan potenciales cerebrales. También se han detectado alteraciones de la función del sistema nervioso central humano al utilizar potenciales cerebrales evocados por el sistema auditivo (Seidel y cols. 1992). En los efectos influían otros factores ambientales (p. ej., el ruido), la dificultad de la tarea y el estado interno del sujeto (p. ej., activación, grado de atención hacia el estímulo).

### **Efectos a largo plazo**

#### **Riesgo para la salud de la columna vertebral**

Los estudios epidemiológicos indican con frecuencia que existe un riesgo elevado para la salud en la columna vertebral de los trabajadores expuestos durante muchos años a intensas

vibraciones de cuerpo completo (p. ej., trabajo en tractores o máquinas de movimiento de tierras). Seidel y Heide (1986), Dupuis y Zerlett (1986) y Bongers y Boshuizen (1990) han realizado minuciosos estudios de la literatura. En estas revisiones se llega a la conclusión de que intensas vibraciones de cuerpo completo de larga duración puede afectar negativamente a la columna e incrementar el riesgo de molestias lumbares. Tales molestias pueden ser consecuencia secundaria de una alteración degenerativa primaria de las vértebras y discos intervertebrales. Se descubrió que la parte afectada con más frecuencia es la región lumbar de la columna vertebral, seguida de la región torácica. Una elevada proporción de los deterioros de la región cervical, comunicados por varios autores, parecen estar causados por una postura fija desfavorable y no por la vibración, aunque no existe ninguna evidencia concluyente de la validez de esta hipótesis. Solo en unos pocos estudios se ha considerado la función de los músculos de la espalda y se ha encontrado una insuficiencia muscular. Algunos informes señalan un riesgo sensiblemente mayor de dislocación de los discos lumbares. En varios estudios de muestras representativas, Bongers y Boshuizen (1990) encontraron más casos de molestias lumbares en conductores de vehículos terrestres y en pilotos de helicópteros que en trabajadores de referencia comparables. Finalmente llegaron a la conclusión de que la conducción profesional de vehículos y el pilotaje de helicópteros son factores de riesgo importantes para las molestias lumbares y los trastornos de la espalda. Se observó un aumento del número de pensiones por discapacidad y de las bajas laborales de larga duración debido a trastornos relacionados con los discos intervertebrales entre los operadores de grúas y conductores de tractores.

Debido a la falta de datos o a la existencia de datos incompletos sobre las condiciones de exposición en los estudios epidemiológicos, no se pudieron obtener relaciones exactas entre exposición y efecto. Los datos existentes no permiten establecer un nivel sin efectos adversos (es decir, un límite de seguridad) que posibilite prevenir de modo fiable las enfermedades de la columna. Muchos años de exposición por debajo o cerca del límite de exposición contemplado en la versión actual de la Norma Internacional 2631 (ISO 1985) no excluyen el riesgo. Algunos hallazgos indican un aumento del riesgo para la salud cuando aumenta la duración de la exposición, si bien los procesos de selección han hecho que resulte difícil detectar una relación en la mayoría de los estudios. Por lo tanto, las investigaciones epidemiológicas no permiten establecer actualmente una relación entre dosis y efecto. Consideraciones teóricas sugieren efectos marcadamente perjudiciales de las cargas pico elevadas que actúan sobre la columna durante las exposiciones con altos valores transitorios. Por lo tanto, el uso de un método de "energía equivalente" para calcular la dosis de vibración (como el de la Norma Internacional 2631 (ISO 1985)) es cuestionable para exposiciones a vibraciones de cuerpo completo que contienen altas aceleraciones pico. Los efectos a largo plazo por las vibraciones de cuerpo completo dependiendo de la frecuencia de vibración no se han deducido de los estudios epidemiológicos. Las vibraciones de cuerpo completo a frecuencias de 40 a 50 Hz aplicada a través de los pies a operarios en posición de pie, fue seguida de cambios degenerativos de los huesos de los pies.

Por lo general, las diferencias entre sujetos se han pasado por alto en gran medida, aunque los fenómenos de la selección sugieren que pueden tener gran importancia. No hay datos claros que indiquen si los efectos de las vibraciones de cuerpo completo sobre la columna dependen del sexo.

La aceptación general de los trastornos degenerativos de la columna como enfermedad de origen profesional es objeto de debate. No se conocen elementos de diagnóstico específicos que

permitan una diagnosis fiable del trastorno como consecuencia de la exposición a las vibraciones de cuerpo completo. Una elevada prevalencia de trastornos de columna degenerativos en poblaciones no expuestas impide confirmar la suposición de una etiología predominantemente profesional en individuos expuestos a vibraciones de cuerpo completo. No se conocen factores de riesgo individuales de tipo constitucional que pudieran modificar la tensión inducida por la vibración. La referencia a una intensidad mínima y/o una duración mínima de las vibraciones de cuerpo completo como requisito previo para el reconocimiento del origen profesional de una enfermedad no tendría en cuenta la considerable variabilidad que cabe esperar en cuanto a susceptibilidad individual.

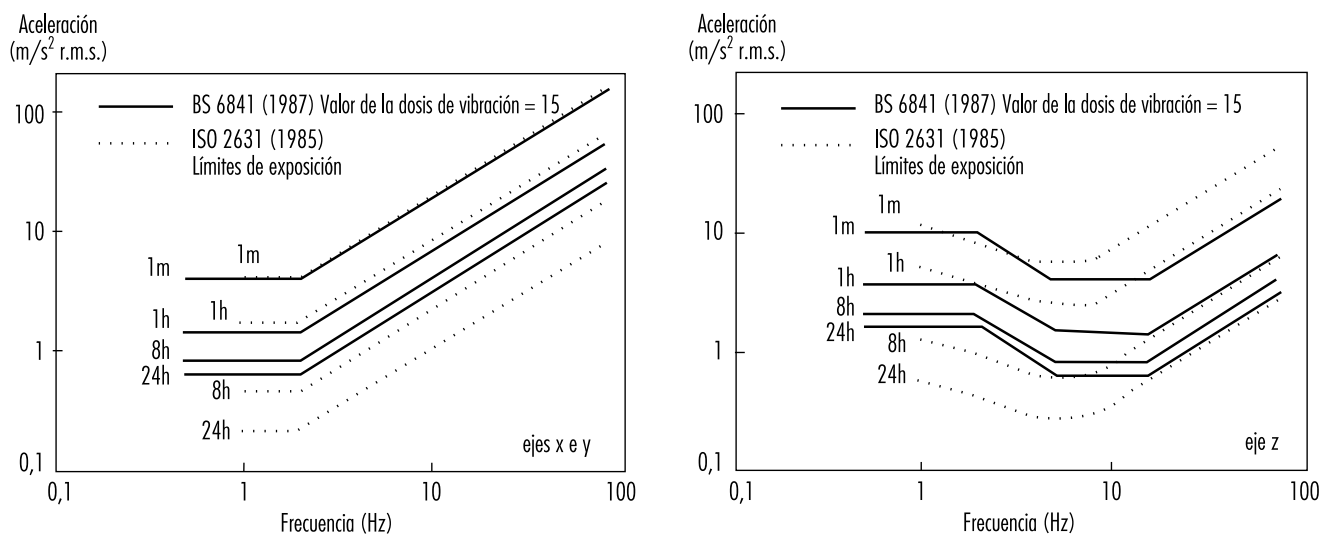
### Otros riesgos para la salud

Estudios epidemiológicos sugieren que las vibraciones de cuerpo completo es solo uno entre un grupo de factores causales que contribuyen a otros riesgos para la salud. El ruido, la elevada tensión mental y el trabajo por turnos son ejemplos de factores concomitantes importantes que se sabe están relacionados con trastornos de la salud. Con frecuencia, las investigaciones de los trastornos de otros sistemas corporales han dado resultados divergentes o que indican una dependencia paradójica de la prevalencia de la patología respecto de la magnitud de las vibraciones de cuerpo completo (es decir, mayor prevalencia de efectos adversos a menor intensidad). Se ha observado un complejo característico de síntomas y alteraciones patológicas del sistema nervioso central, el sistema musculoesquelético y el sistema circulatorio en operarios que trabajan de pie en máquinas utilizadas para la vibrocompactación de hormigón y están expuestos a niveles de vibraciones de cuerpo completo por encima del límite de exposición especificado en la Norma ISO 2631 con frecuencias superiores a 40 Hz (Rumjancev 1966). Se ha denominado a este complejo "enfermedad de las vibraciones". La misma expresión, aunque con el rechazo de muchos especialistas, se ha utilizado a veces para describir un vago cuadro clínico causado por exposición de larga duración a vibraciones de cuerpo completo a baja frecuencia que, al parecer, se manifiesta inicialmente en forma de trastornos vegetativo-vasculares periféricos y cerebrales de carácter funcional inespecífico. De acuerdo con los datos disponibles se puede extraer la conclusión de que diferentes sistemas fisiológicos reaccionan independientemente unos de otros y que no existen síntomas que puedan servir como indicador de patología inducida por vibraciones de cuerpo completo.

*Sistema nervioso, órgano vestibular y audición.* Las vibraciones de cuerpo completo intensas a frecuencias superiores a 40 Hz puede causar daños y alteraciones del sistema nervioso central. Se han comunicado datos contradictorios sobre los efectos de la vibración de cuerpo completo a frecuencias inferiores a 20 Hz. Solo en algunos estudios se ha encontrado un aumento de molestias inespecíficas, tales como dolor de cabeza y aumento de la irritabilidad. Un autor ha afirmado la aparición de alteraciones del electroencefalograma (EEG) tras la exposición de larga duración a vibraciones de cuerpo completo y otros las han negado. Algunos de los resultados publicados apuntan hacia una menor excitabilidad vestibular y una mayor incidencia de otras alteraciones vestibulares, entre las que se incluye el vértigo. Ahora bien, se mantiene la incertidumbre respecto a la existencia de relaciones causales entre vibraciones de cuerpo completo y alteraciones del sistema nervioso central o el sistema vestibular, al haberse detectado relaciones paradójicas entre intensidad y efecto.

En algunos estudios, se ha observado un aumento adicional de los desplazamientos permanentes del umbral (PTS) de audición tras una exposición combinada de larga duración a las vibraciones de cuerpo completo y al ruido. Schmidt (1987)

Figura 50.1 • Dependencias de la frecuencia en cuanto a la respuesta humana a la vibración de cuerpo completo.



estudió a conductores y técnicos en el campo de la agricultura y comparó los desplazamientos permanentes del umbral después de 3 y 25 años de trabajo. Llegó a la conclusión de que las vibraciones de cuerpo completo puede inducir un desplazamiento adicional significativo del umbral a 3, 4, 6 y 8 kHz, si la aceleración ponderada según la Norma Internacional 2631 (ISO 1985) supera un valor eficaz de 1,2 m/s<sup>2</sup> con exposición simultánea al ruido a un nivel equivalente de más de 80 decibelios (dBA).

**Sistemas circulatorio y digestivo.** Se han detectado cuatro grupos principales de alteraciones circulatorias con mayor incidencia entre trabajadores expuestos a vibraciones de cuerpo completo:

1. Trastornos periféricos, tales como el síndrome de Raynaud, cerca del punto de aplicación de la vibración de cuerpo completo (es decir, los pies de los operarios en posición de pie o, en menor grado, las manos de los conductores).
2. Venas varicosas de las piernas, hemorroides y varicocele.
3. Cardiopatía isquémica e hipertensión.
4. Alteraciones neurovasculares.

No siempre existe correlación entre la morbilidad de estas alteraciones circulatorias y la magnitud o duración de la exposición a la vibración. Aunque frecuentemente se ha observado una elevada prevalencia de diversos trastornos del sistema digestivo, casi todos los autores coinciden en que las vibraciones de cuerpo completo es solo una de las causas y quizá no la más importante.

**Organos reproductores femeninos, embarazo y sistema genitourinario masculino.** Se cree que el aumento del riesgo de aborto, alteraciones menstruales y anomalías posicionales (p. ej., desprendimiento de útero) puede estar relacionado con la exposición de larga duración a las vibraciones de cuerpo completo (véase Seidel y Heide 1986). No se puede deducir de la literatura un umbral de exposición seguro que evite un aumento de estos riesgos para la salud. La susceptibilidad individual y sus variaciones temporales probablemente codeterminan estos efectos biológicos. En la literatura disponible no se ha comunicado un efecto perjudicial directo de la vibración de cuerpo completo sobre el feto humano, aunque algunos estudios en animales sugieren que la vibración de cuerpo completo puede afectar al feto. El desconocimiento del valor umbral para los efectos adversos sobre el embarazo sugiere la conveniencia

de limitar la exposición de origen profesional al mínimo razonable.

Se han publicado resultados divergentes sobre la aparición de enfermedades del sistema genitourinario masculino. En algunos estudios, se ha observado una mayor incidencia de prostatitis. Otros estudios no han podido confirmar estos hallazgos.

### Normas

Aunque no puede ofrecerse ningún límite preciso para prevenir los trastornos causados por las vibraciones de cuerpo completo, las normas definen métodos útiles para cuantificar la intensidad de las vibraciones. La Norma Internacional 2631 (ISO 1974, 1985) definió límites de exposición (véase la Figura 50.1) "establecidos aproximadamente en la mitad del nivel considerado como umbral del dolor (o límite de tolerancia voluntaria) para sujetos humanos sanos". En la Figura 50.1 se muestra también un nivel de acción del valor de la dosis de vibración para vibración vertical, derivado de la Norma Británica 6841 (BSI 1987b); esta norma es similar, en parte, a un proyecto revisado de la Norma Internacional.

El valor de la dosis de vibración puede considerarse como la magnitud de la vibración de un segundo de duración que sea de igual intensidad que la vibración medida. En el valor de la dosis de vibración se utiliza una dependencia temporal elevada a la cuarta potencia para calcular la intensidad de vibración acumulada durante el período de exposición, desde el choque más corto posible hasta una jornada completa de vibración (p. ej., BSI 6841):

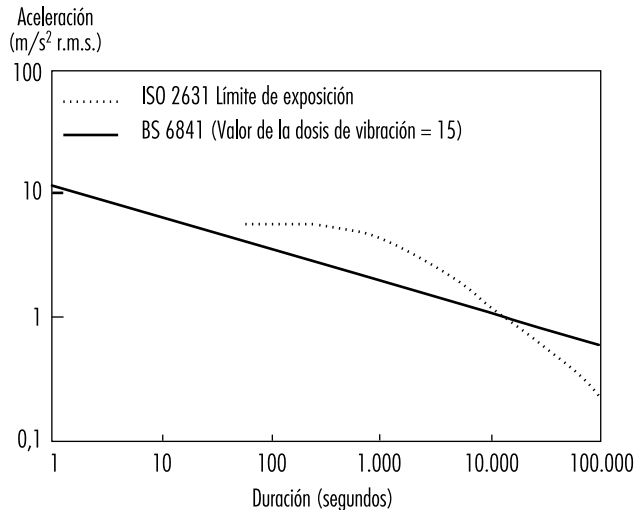
$$\text{Valor de la dosis de vibración} = \left[ \int_{t=0}^{t=\infty} a(t)^4 dt \right]^{1/4}$$

El procedimiento del valor de la dosis de vibración puede utilizarse para valorar la intensidad de la vibración y de los choques repetitivos. Esta dependencia temporal elevada a la cuarta potencia es más fácil de usar que la dependencia temporal contemplada en la Norma ISO 2631 (véase la Figura 50.2).

La Norma Británica 6841 ofrece la siguiente orientación.

Valores altos de la dosis de vibración causan malestar intenso, dolor y lesiones. Los valores de la dosis de vibración

Figura 50.2 • Dependencias del tiempo en cuanto a la respuesta humana a la vibración de cuerpo completo.



indican también, de modo general, la intensidad de las exposiciones a las vibraciones que los han producido. Con todo, actualmente no existe una opinión unánime sobre la relación precisa entre valores de dosis de vibración y riesgo de lesión. Se sabe que las magnitudes y duraciones de las vibraciones que producen valores de dosis de vibración en la región de  $15 \text{ m/s}^{1,75}$  causan generalmente malestar intenso. Es razonable suponer que un aumento de la exposición a las vibraciones irá acompañado de un mayor riesgo de lesión (BSI 1987b).

Con valores altos de la dosis de vibración, puede ser necesario considerar previamente la capacidad física de las personas expuestas y diseñar precauciones de seguridad adecuadas. Puede tomarse también en consideración la necesidad de revisiones periódicas del estado de salud de las personas habitualmente expuestas.

El valor de la dosis de vibración proporciona una medida que permite comparar exposiciones muy variables y complejas. Las organizaciones pueden especificar límites o niveles de acción utilizando el valor de la dosis de vibración. Por ejemplo, en algunos países, se ha utilizado un valor de la dosis de vibración de  $15 \text{ m/s}^{1,75}$  como nivel de acción provisional, pero puede ser conveniente limitar las exposiciones a las vibraciones o a choques repetidos a valores más altos o más bajos dependiendo de la situación. Con lo que sabemos actualmente, un nivel de acción solo sirve para indicar los valores aproximados que podrían ser excesivos. En la Figura 50.2 se indican las aceleraciones eficaces correspondientes a un valor de la dosis de vibración de  $15 \text{ m/s}^{1,75}$  para exposiciones comprendidas entre un segundo y 24 horas. Cualquier exposición a vibraciones continuas, vibraciones intermitentes o choques repetidos pueden compararse con el nivel de acción calculando el valor de la dosis de vibración. No sería prudente rebasar un nivel de acción apropiado (o el límite de exposición según la Norma ISO 2631) sin tener en cuenta los posibles efectos para la salud de una exposición a la vibración o al choque.

La *Directiva sobre seguridad de las máquinas* de la Comunidad Económica Europea establece que la máquina deberá diseñarse y construirse de manera que los riesgos resultantes de las

vibraciones producidas por la misma se reduzcan al mínimo nivel posible, teniendo en cuenta el progreso tecnológico y los medios disponibles para reducir la vibración. La *Directiva sobre seguridad de las máquinas* (Consejo de las Comunidades Europeas 1989) recomienda reducir las vibraciones por medios adicionales a la reducción en la fuente (p. ej., un buen asiento).

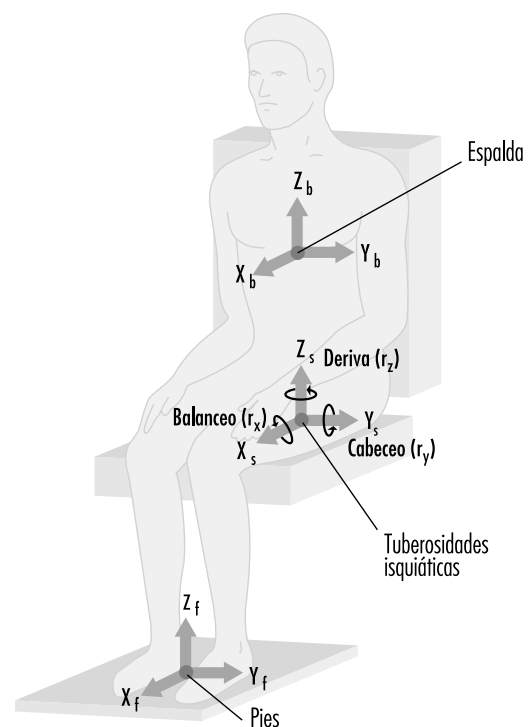
### Medida y valoración de la exposición

Las vibraciones de cuerpo completo debe medirse en las interfaces entre el cuerpo y la fuente de vibración. En el caso de personas sentadas esto implica la colocación de acelerómetros en la superficie del asiento, debajo de las tuberosidades isquiáticas de los sujetos. A veces las vibraciones se miden también en el respaldo del asiento (entre el respaldo y la espalda) así como en los pies y las manos (véase la Figura 50.3).

Los datos epidemiológicos por sí solos no son suficientes para definir cómo valorar las vibraciones de cuerpo completo de un modo que permita predecir los riesgos para la salud derivados de los diferentes tipos de exposición a las vibraciones. En estos momentos, la comprensión de las respuestas biodinámicas y de las respuestas subjetivas tomando en consideración los datos epidemiológicos, proporciona orientación al respecto. Actualmente, se supone que la forma en que los efectos para la salud derivados de los movimientos dependen de la frecuencia, dirección y duración del movimiento es igual o parecida a la del malestar por vibración. Ahora bien, se considera que lo importante es la exposición total, no la exposición promedio, y que por lo tanto es adecuado medir la dosis.

Además de valorar las vibraciones medidas de acuerdo con las normas actuales, es aconsejable informar de los espectros de frecuencia, las magnitudes de los diferentes ejes y otras características de la exposición, incluyendo las duraciones de la exposición diaria y la de toda la vida. También debería tenerse en

Figura 50.3 • Ejes para medir exposiciones a la vibración en personas sentadas.



cuenta la presencia de otros factores ambientales adversos, en especial la postura sentada.

### Prevención

Cuando sea posible se dará preferencia a la reducción de las vibraciones en la fuente. Para ello puede ser necesario reducir las ondulaciones del terreno o la velocidad de desplazamiento de los vehículos. Otros métodos para reducir la transmisión de vibraciones a los operarios exigen comprender las características del entorno de las vibraciones y la ruta de transmisión de las vibraciones al cuerpo. Por ejemplo, a menudo la magnitud de la vibración depende de la ubicación: en algunas zonas se experimentan magnitudes menores. En la Tabla 50.2 se ofrece una lista de algunas medidas preventivas que pueden tenerse en cuenta.

Tabla 50.2 • Resumen de medidas preventivas que han de considerarse cuando las personas están expuestas a vibración global de todo el cuerpo.

Grupo	Acción
Dirección	<ul style="list-style-type: none"> <li>Obtener asesoramiento técnico</li> <li>Obtener asesoramiento médico</li> <li>Prevenir a las personas expuestas</li> <li>Formar a las personas expuestas</li> <li>Analizar los tiempos de exposición</li> <li>Adoptar medidas para retirar a los afectados de la exposición</li> </ul>
Fabricantes de máquinas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medir la vibración</li> <li>Diseño que minimice las vibraciones de cuerpo completo</li> <li>Optimizar el diseño de la suspensión</li> <li>Optimizar la dinámica de los asientos</li> <li>Utilizar un diseño ergonómico para permitir una postura correcta, etc.</li> <li>Asesorar en el mantenimiento de la máquina</li> <li>Asesorar en el mantenimiento de los asientos</li> <li>Alertar sobre las vibraciones peligrosas</li> </ul>
Técnicos: en el lugar de trabajo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medir la exposición a las vibraciones</li> <li>Proveer máquinas adecuadas</li> <li>Seleccionar asientos con buena atenuación</li> <li>Mantener las máquinas</li> <li>Informar a la dirección</li> </ul>
Médicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reconocimiento selectivo antes de la contratación</li> <li>Revisiones médicas periódicas</li> <li>Anotar todos los síntomas comunicados</li> <li>Advertir a los trabajadores con predisposición evidente</li> <li>Asesorar sobre las consecuencias de la exposición</li> <li>Informar a la dirección</li> </ul>
Personas expuestas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilizar la máquina correctamente</li> <li>Evitar la exposición innecesaria a las vibraciones</li> <li>Comprobar que el asiento está bien ajustado</li> <li>Adoptar una postura sentada correcta</li> <li>Comprobar el estado de la máquina</li> <li>Informar al supervisor de los problemas de vibraciones</li> <li>Obtener asesoramiento médico si aparecen síntomas</li> <li>Informar a la empresa de los trastornos correspondientes</li> </ul>

Fuente: Adaptado de Griffin 1990.

Se pueden diseñar los asientos de manera que atenúen las vibraciones. La mayoría de los asientos presentan resonancia a bajas frecuencias, lo que hace que se produzcan mayores magnitudes de vibración vertical en el asiento que en el piso. A altas frecuencias suele producirse una atenuación de las vibraciones. En la práctica, las frecuencias de resonancia de los asientos habituales están en la región de los 4 Hz. La amplificación en resonancia viene determinada en parte por la amortiguación del asiento. Un aumento de la capacidad de amortiguación del relleno del asiento tiende a reducir la amplificación en resonancia pero aumenta la transmisibilidad a altas frecuencias. Hay grandes variaciones de transmisibilidad entre asientos, las cuales se traducen en considerables diferencias en cuanto a la vibración que experimentan las personas.

Una indicación numérica simple de la eficacia de aislamiento de un asiento para una aplicación específica, es la que proporciona la transmisibilidad de la amplitud eficaz del asiento (SEAT) (véase Griffin 1990). Un valor de SEAT superior al 100 % indica que, globalmente, las vibraciones en el asiento son peores que las vibraciones en el piso. Valores inferiores al 100 % indican que el asiento ha proporcionado algo de atenuación útil. Los asientos deberían diseñarse de manera que tuviesen el valor SEAT más bajo que sea compatible con otras limitaciones.

Los asientos con suspensión llevan un mecanismo de suspensión separado debajo del panel del asiento. Se utilizan en algunos vehículos todo terreno, así como en camiones y autocares, y sus frecuencias de resonancia son bajas (en torno a 2 Hz) y por lo tanto pueden atenuar las vibraciones a frecuencias superiores a unos 3 Hz. Los valores de transmisibilidad de estos asientos los determina normalmente el fabricante del asiento, pero sus eficacias de aislamiento varían según las condiciones de trabajo.

## VIBRACIONES TRANSMITIDAS A LAS MANOS

**Massimo Bovenzi**

### Exposición de origen profesional

Las vibraciones mecánicas producida por procesos o herramientas a motor y que penetran en el cuerpo por los dedos o la palma de las manos se denominan *vibraciones transmitidas a las manos*. Como sinónimos de vibraciones transmitidas a las manos se utilizan con frecuencia las expresiones vibraciones mano-brazo y vibraciones locales o segmentarias. En varias actividades industriales se encuentran muy extendidos los procesos y herramientas a motor que exponen las manos del operario a vibraciones. La exposición de origen profesional a las vibraciones transmitidas a las manos proviene de las herramientas a motor que se utilizan en fabricación (p. ej., herramientas de percusión para trabajo de metales, amoladoras y otras herramientas rotativas, llaves de impacto), explotación de canteras, minería y construcción (p. ej., martillos perforadores de roca, martillos rompedores de piedra, martillos picadores, compactadores vibrantes), agricultura y trabajos forestales (p. ej., sierras de cadena, sierras de recortar, descortezadoras) y servicios públicos (p. ej., martillos rompedores de asfalto y hormigón, martillos perforadores, amoladoras de mano). También puede producirse exposición a vibraciones transmitidas a las manos por piezas vibrantes sostenidas con las manos del operario, como en el amolado de columna, y por controles manuales vibrantes, como al utilizar cortacéspedes o controlar rodillos vibrantes para compactación de carreteras. Se ha comunicado que el número de personas expuestas a vibraciones transmitidas a las manos en el trabajo excede de



150.000 en los Países Bajos, de 0,5 millones en Gran Bretaña y de 145 millones en Estados Unidos. La exposición excesiva a las vibraciones transmitidas a las manos puede causar trastornos en los vasos sanguíneos, nervios, músculos, huesos y articulaciones de las extremidades superiores. Se calcula que del 1,7 al 3,6 % de los trabajadores de los países europeos y de Estados Unidos están expuestos a vibraciones transmitidas a las manos potencialmente peligrosa (AISSA Sección Internacional de Investigación 1989). La expresión síndrome de vibraciones mano-brazo (HAV) se utiliza comúnmente en referencia a los síntomas asociados con exposición a vibraciones transmitidas a las manos, a saber:

- trastornos vasculares;
- trastornos neurológicos periféricos;
- trastornos de los huesos y articulaciones;
- trastornos musculares,
- otros trastornos (todo el cuerpo, sistema nervioso central).

Actividades tales como la conducción de motocicletas o el uso de herramientas vibrantes domésticas pueden exponer las manos esporádicamente a vibraciones de gran amplitud, pero solo las largas exposiciones diarias pueden provocar problemas de salud (Griffin 1990).

La relación entre exposición a vibraciones transmitidas a las manos de origen profesional y efectos adversos para la salud dista de ser sencilla. En la Tabla 50.3 se proporciona una lista de algunos de los factores más importantes que contribuyen a causar lesiones en las extremidades superiores de los trabajadores expuestos a vibración.

### Biodinámica

Cabe suponer que los factores que influyen en la transmisión de vibraciones al sistema de los dedos, la mano y el brazo desempeñan un papel importante en la génesis de lesiones por vibraciones. La transmisión de vibraciones depende de las características físicas de la vibración (magnitud, frecuencia, dirección) y de la respuesta dinámica de la mano (Griffin 1990).

### Transmisibilidad e impedancia

Los resultados experimentales indican que el comportamiento mecánico de la extremidad superior humana es complejo, dado que la impedancia del sistema de la mano y el brazo—es decir, la resistencia a vibrar—presenta marcadas variaciones en función de los cambios de amplitud de vibración, frecuencia y dirección, fuerzas aplicadas y orientación de la mano y el brazo con respecto al eje del estímulo. En la impedancia influye también la constitución corporal y las diferencias estructurales de las diversas partes de la extremidad superior (p. ej., la impedancia mecánica de los dedos es muy inferior a la de la palma de la mano). En general, a mayores niveles de vibración y a mayores presiones de agarre de la mano, mayor impedancia. Con todo, se ha descubierto que las variaciones de impedancia dependen considerablemente de la frecuencia y dirección del estímulo de la vibración y de las diversas fuentes de intravariabilidad e intervariabilidad del sujeto. En varios estudios se ha comunicado la existencia de una región de resonancia para el sistema de los dedos, la mano y el brazo en la gama de frecuencia comprendida entre 80 y 300 Hz.

Medidas de la transmisión de vibraciones a través del brazo humano han mostrado que las vibraciones de baja frecuencia (<50 Hz) se transmiten con poca atenuación a lo largo de la mano y el antebrazo. La atenuación en el codo depende de la postura del brazo, dado que la transmisión de vibraciones tiende a disminuir a medida que aumenta el ángulo de flexión en la articulación del codo. A frecuencias altas (>50 Hz), la transmisión de vibraciones disminuye progresivamente a medida que

Tabla 50.3 • Algunos factores potencialmente relacionados con efectos lesivos durante las exposiciones a las vibraciones transmitidas a las manos.

#### Características de la vibración

- Magnitud (eficaz, pico, ponderada/no ponderada)
- Frecuencia (espectros, frecuencias dominantes)
- Dirección (ejes x, y, z)

#### Herramientas o procesos

- Diseño de herramientas (portátiles, fijas)
- Tipo de herramienta (de percusión, rotativa, rotopercutante)
- Condición
- Operación
- Material que se trabaja

#### Condiciones de exposición

- Duración (exposiciones diarias, anuales)
- Modelo de exposición (continua, intermitente, periodos de descanso)
- Duración de la exposición acumulada

#### Condiciones ambientales

- Temperatura ambiente
- Flujo de aire
- Humedad
- Ruido
- Respuesta dinámica del sistema dedo-mano-brazo
- Impedancia mecánica
- Transmisibilidad de la vibración
- Energía absorbida

#### Características individuales

- Método de trabajo (fuerza de agarre, fuerza de empuje, postura de mano-brazo, posición del cuerpo)
- Salud
- Formación
- Destreza
- Uso de guantes
- Susceptibilidad individual a la lesión

aumenta la frecuencia, y por encima de 150 a 200 Hz la mayor parte de la energía de vibración se disipa en los tejidos de la mano y los dedos. De las medidas de transmisibilidad se infiere que en la región de alta frecuencia, las vibraciones pueden ser responsable de daños a las estructuras blandas de los dedos y manos, mientras que las vibraciones de baja frecuencia y gran amplitud (p. ej., producida por herramientas de percusión) podría estar relacionada con lesiones de muñeca, codo y hombro.

### Factores que influyen en la dinámica de los dedos y la mano

Cabe suponer que los efectos adversos de la exposición a las vibraciones están relacionados con la energía disipada en las extremidades superiores. La absorción de energía depende en gran medida de factores que afectan al acoplamiento del sistema dedos-mano a la fuente de vibraciones. Variaciones de la presión de agarre, fuerza estática y postura, modifican la respuesta dinámica del dedo, la mano y el brazo y, por consiguiente, la cantidad de energía transmitida y absorbida. Por

ejemplo, la presión de agarre influye considerablemente en la absorción de energía y, en general, cuanto mayor es esta presión mayor es la fuerza transmitida al sistema de la mano y el brazo. Los datos de respuesta dinámica pueden suministrar información importante para valorar el potencial de las vibraciones de la herramienta para producir lesiones y para facilitar el desarrollo de dispositivos antivibración tales como empuñaduras y guantes.

## Efectos agudos

### *Malestar subjetivo*

La vibración es detectada por diversos mecanorreceptores de la piel, situados en los tejidos (epi) dérmicos y subcutáneos de la piel lisa y desnuda (glabra) de los dedos y manos. Tales receptores se clasifican en dos categorías —de adaptación lenta y rápida— según sus propiedades de adaptación y su campo receptor. En las unidades mecanorreceptoras de adaptación lenta se encuentran los discos de Merkel y las terminaciones de Ruffini, que responden a la presión estática y a pequeñas variaciones de presión y son excitados a baja frecuencia (<16 Hz). Las unidades de adaptación rápida tienen los corpúsculos de Meissner y de Pacinian, que responden a variaciones rápidas de los estímulos y se encargan de producir la sensación de vibración en la gama de frecuencia entre 8 y 400 Hz. La respuesta subjetiva a las vibraciones transmitidas a las manos se ha utilizado en varios estudios para obtener valores umbral, contornos de sensación equivalente y límites de sensación desagradable o de tolerancia a los estímulos vibratorios a diferentes frecuencias (Griffin 1990). Los resultados experimentales indican que la sensibilidad humana a la vibración disminuye a medida que aumenta la frecuencia, tanto en lo que se refiere a los niveles de vibración confortables como molestos. La vibración vertical parece causar mayor malestar que la vibración en otras direcciones. Se ha observado también que el malestar subjetivo está en función de la composición espectral de la vibración y de la fuerza de agarre ejercida sobre la empuñadura que vibra.

### *Perturbación de la actividad*

La exposición aguda a vibraciones transmitidas a las manos puede causar un aumento temporal de los umbrales vibrotáctiles debido a una depresión de la excitabilidad de los mecanorreceptores de la piel. La magnitud de la variación temporal de estos umbrales, así como el tiempo de recuperación están sujetos a la influencia de distintas variables, tales como las características del estímulo (frecuencia, amplitud, duración), la temperatura y la edad y exposición anterior a la vibración del trabajador. La exposición al frío agrava la depresión táctil inducida por las vibraciones, debido a que la baja temperatura tiene un efecto vasoconstrictor en la circulación digital y reduce la temperatura de la piel de los dedos. En trabajadores expuestos a vibraciones que trabajan habitualmente en ambientes fríos, los episodios repetidos de deterioro agudo de la sensibilidad táctil puede conducir a una reducción permanente de la percepción sensorial y a la pérdida de destreza de manipulación lo que, a su vez, puede interferir en la actividad laboral y elevar el riesgo de lesiones graves por accidentes.

## Efectos no vasculares

### *Esqueléticos*

Las lesiones óseas y articulares inducidas por las vibraciones son objeto de controversia. Diversos autores consideran que los trastornos de huesos y articulaciones en trabajadores que utilizan herramientas vibrantes de mano, no tienen carácter específico ni son similares a los originados por el proceso de envejecimiento y

por el trabajo manual pesado. Por otra parte, algunos investigadores han comunicado que la exposición prolongada a vibraciones transmitidas a las manos puede producir alteraciones esqueléticas características en las manos, muñecas y codos. Estudios radiológicos realizados en un primer momento revelaron una alta prevalencia de vacuolas y quistes óseos en las manos y muñecas de trabajadores expuestos a vibraciones, pero otros estudios más recientes no han mostrado ningún aumento significativo con respecto a grupos de control integrados por trabajadores manuales. Se ha comunicado una prevalencia elevada de osteoartritis de muñeca y artrosis y osteofitosis de codo en mineros del carbón, trabajadores de la construcción de carreteras y trabajadores del metal expuestos a choques y a vibración de baja frecuencia y gran amplitud producida por herramientas neumáticas de percusión. Por el contrario, hay poca evidencia de aumento de la prevalencia de trastornos óseos y articulares degenerativos en las extremidades superiores de los trabajadores expuestos a vibraciones de mediana o alta frecuencia procedentes de sierras de cadena o amoladoras. El esfuerzo físico intenso, un agarre con fuerza y otros factores biomecánicos pueden ser la causa de la mayor aparición de lesiones esqueléticas encontrada en trabajadores que utilizan herramientas de percusión. El dolor localizado, la hinchazón y la rigidez y deformidades de las articulaciones pueden estar relacionados con hallazgos radiológicos de degeneración ósea y articular. En unos cuantos países (Francia, Alemania e Italia entre ellos), se considera que los trastornos óseos y articulares que aparecen en trabajadores que utilizan herramientas de mano vibrantes, son una enfermedad de origen profesional, y los trabajadores afectados son indemnizados.

### *Neurológicos*

Los trabajadores que manejan herramientas vibrantes pueden sufrir hormigueo y adormecimiento de dedos y manos. Si la exposición a las vibraciones continúa, estos síntomas tienden a empeorar y pueden interferir con la capacidad de trabajo y las actividades de su vida diaria. Los trabajadores expuestos a vibraciones pueden presentar umbrales vibratorios, térmicos y táctiles más elevados en los reconocimientos clínicos. Se ha sugerido que la exposición continua a las vibraciones no solo puede deprimir la excitabilidad de los receptores de la piel sino también inducir alteraciones patológicas en los nervios de los dedos, tales como edema perineural, seguido de fibrosis y pérdida de fibra nerviosa. Estudios epidemiológicos de trabajadores expuestos a vibraciones señalan que la prevalencia de trastornos neurológicos periféricos varía desde un pequeño porcentaje hasta más del 80 por ciento, y que la pérdida de sensibilidad afecta a usuarios de una amplia variedad de tipos de herramientas. Parece ser que la neuropatía por vibración se desarrolla con independencia de otros trastornos inducidos por las vibraciones. En el Taller de Estocolmo (Stockholm Workshop) 86 (1987) se propuso una

Tabla 50.4 • Fases neurosensoriales de la escala del Taller de Estocolmo para el síndrome de vibraciones mano-brazo.

Fase	Síntomas
0SN	Expuesto a vibración pero sin síntomas
1SN	Adormecimiento intermitente, con o sin hormigueo
2SN	Adormecimiento intermitente o persistente, percepción sensorial reducida
3SN	Adormecimiento intermitente o persistente, discriminación táctil y/o destreza de manipulación reducidas

Fuente: Stockholm Workshop 86 1987.

escala del componente neurológico de síndrome de HAV, consistente en tres fases según los síntomas y los resultados del reconocimiento clínico y las pruebas objetivas (Tabla 50.4). Se requiere un diagnóstico diferencial cuidadoso para distinguir la neuropatía por vibraciones de neuropatías por compresión, tales como el síndrome del túnel carpiano (CTS), un trastorno debido a compresión del nervio mediano a su paso por un túnel anatómico de la muñeca. El CTS parece ser un trastorno común en algunos grupos profesionales que utilizan herramientas vibrantes, tales como los perforadores, los chapistas y los trabajadores forestales. Se cree que los factores de estrés ergonómicos que actúan sobre la mano y la muñeca (movimientos repetitivos, agarre con fuerza, malas posturas), unidos a las vibraciones, pueden causar CTS en trabajadores que manejan herramientas vibrantes. La electroneuromiografía, que mide las velocidades de los nervios sensoriales y motores, ha demostrado ser útil para diferenciar el CTS de otros trastornos neurológicos.

### Musculares

Los trabajadores expuestos a vibraciones pueden quejarse de debilidad muscular y dolor en las manos y brazos. En algunos individuos la fatiga muscular puede causar discapacidad. En algunos estudios de seguimiento de leñadores se ha comunicado una disminución de la fuerza de agarre de la mano. Se han sugerido lesión mecánica directa o daño del nervio periférico como posibles factores etiológicos de los síntomas musculares. También se han comunicado otros trastornos relacionados con el trabajo en trabajadores expuestos a vibraciones, como tendinitis y tenosinovitis en las extremidades superiores, y contractura de Dupuytren, una enfermedad del tejido fascial de la palma de la mano. Tales trastornos parecen tener relación con factores de estrés ergonómicos derivados del trabajo manual pesado, y la asociación con vibración transmitida a las manos no es concluyente.

### Trastornos vasculares

#### Fenómeno de Raynaud

Giovanni Loriga, médico italiano, comunicó por primera vez en 1911 que los cortadores de piedra que utilizan martillos neumáticos en bloques de mármol y piedra en algunas serrerías de Roma, sufrían ataques de blanqueado de los dedos, semejantes a la respuesta vasospástica digital al frío o al estrés emocional descrita por Maurice Raynaud en 1862. Observaciones similares fueron realizadas por Alice Hamilton (1918) en cortadores de piedra en Estados Unidos, y más tarde por varios otros investigadores. En la literatura se han utilizado diversos sinónimos para describir trastornos vasculares inducidos por vibraciones: dedo muerto o blanco, fenómeno de Raynaud de origen profesional, enfermedad vasospástica traumática y, más recientemente, dedo blanco inducido por vibración (VWF). Clínicamente, el VWF se caracteriza por episodios de dedos blancos o pálidos causados por oclusión espástica de las arterias digitales. Los ataques suelen desencadenarse por el frío y duran de 5 a 30 o 40 minutos. Durante un ataque puede experimentarse pérdida completa de sensibilidad táctil. En la fase de recuperación, normalmente acelerada por calor o masaje local, puede aparecer enrojecimiento de los dedos afectados a causa de un aumento reactivo del flujo sanguíneo en los vasos cutáneos. En los pocos casos avanzados, los ataques vasospásticos digitales graves y repetidos pueden conducir a alteraciones tróficas (ulceración o gangrena) en la piel de las puntas de los dedos. Para explicar el fenómeno de Raynaud inducido por el frío en trabajadores expuestos a vibraciones, algunos investigadores invocan un reflejo vasoconstrictor simpático central exagerado causado por exposición prolongada a vibraciones perjudiciales, mientras que otros tienden a enfatizar el papel de las alteraciones locales inducidas por las vibraciones

en los vasos digitales (p. ej., engrosamiento de la pared muscular, daño endotelial, alteraciones del receptor funcional). En el Taller de Estocolmo 86 (1987), se propuso una escala de gradación para la clasificación del VWF, (Tabla 50.5). También se dispone de un sistema numérico para los síntomas de VWF desarrollado por Griffin y basado en puntuaciones para el blanqueado de las diferentes falanges (Griffin 1990). Para diagnosticar objetivamente el VWF se utilizan varias pruebas de laboratorio. La mayoría de ellas se basan en la provocación de frío y en la medida de la temperatura de la piel del dedo o del flujo y la presión de la sangre digital antes y después de enfriar los dedos y las manos. Estudios epidemiológicos han demostrado que la prevalencia de VWF varía ampliamente desde 1 a 100 por cien. Se ha descubierto que el VWF está relacionado con el uso de herramientas de percusión para el trabajo de metales, amoladoras y otras herramientas rotativas, martillos percusores y perforadores utilizados en excavación, maquinaria vibrante empleada en el trabajo forestal y otras herramientas y procesos motorizados. El VWF está reconocido como enfermedad de origen profesional en muchos países. Desde 1975-80 se comunicó un descenso de la incidencia de nuevos casos de VWF entre trabajadores forestales tanto en Europa como en Japón, tras la introducción de sierras de cadena con sistemas antivibración y la aplicación de medidas administrativas que reducen el tiempo de utilización de las sierras. No se dispone aún de hallazgos similares para otros tipos de herramientas.

### Otros trastornos

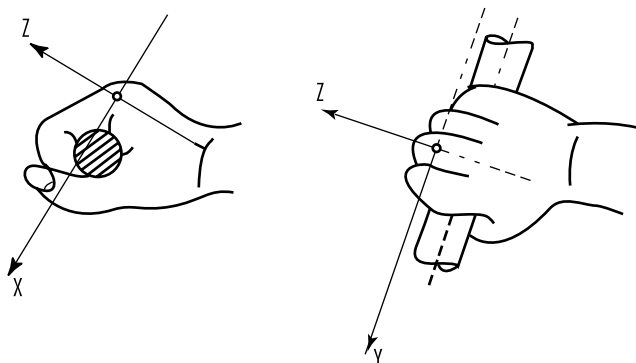
Algunos estudios indican que en los trabajadores afectados de VWF la pérdida de audición es mayor de lo esperado en función del envejecimiento y de la exposición al ruido por el uso de herramientas vibrantes. Se ha sugerido que los sujetos con VWF pueden presentar un riesgo adicional de deterioro auditivo debido a vasoconstricción simpática refleja, inducida por vibración, de los vasos sanguíneos que irrigan el oído interno. Además de trastornos periféricos, algunas escuelas rusas y japonesas de medicina del trabajo han comunicado otros efectos adversos para la salud que afectan al sistema endocrino y al sistema nervioso central de trabajadores expuestos a vibración (Griffin 1990). El cuadro clínico denominado "enfermedad de las vibraciones", incluye signos y síntomas relacionados con la disfunción de los centros autónomos del cerebro (p. ej., fatiga persistente, dolor de cabeza, irritabilidad, perturbaciones del sueño, impotencia, anomalías electroencefalográficas). Se trata de hallazgos que han

Tabla 50.5 • Escala del Taller de Estocolmo para las fases del fenómeno de Raynaud inducido por el frío en el síndrome de vibraciones mano-brazo.

Fase	Grado	Síntomas
0	—	Ningún ataque
1	Leve	Ataques esporádicos que sólo afectan a las puntas de uno o más dedos
2	Moderado	Ataques esporádicos que afectan a las falanges distal y media (rara vez también a la proximal) de uno o más dedos
3	Grave	Ataques frecuentes que afectan a todas las falanges de la mayoría de los dedos
4	Muy grave	Como en la fase 3, con alteraciones tróficas de la piel en las puntas de los dedos

Fuente: Stockholm Workshop 86 1987.

Figura 50.4 • Sistema de coordenadas basicéntrico para la medición de las vibraciones transmitidas a las manos.



Fuente: ISO 5349 1986.

de interpretarse con cautela; hacen falta más trabajos de investigación epidemiológica y clínica cuidadosamente diseñados para confirmar la hipótesis de una asociación entre trastornos del sistema nervioso central y la exposición a vibraciones transmitidas a las manos.

### Normas

Varios países han adoptado normas o directrices sobre exposición a vibraciones transmitidas a las manos. La mayoría de ellas están basadas en la Norma Internacional 5349 (ISO 1986). Para medir las vibraciones transmitidas a las manos, la Norma ISO 5349 recomienda el empleo de una curva de ponderación de frecuencia que proporcione un valor aproximado de la sensibilidad de la mano a los estímulos de vibración dependiente de la frecuencia. La aceleración de la vibración ponderada en frecuencia ( $a_{h,w}$ ) se obtiene con un filtro de ponderación adecuado o sumando los valores de aceleración ponderada medidos en bandas de octava y de tercio de octava a lo largo de un sistema de coordenadas ortogonales ( $x_h, y_h, z_h$ ), (véase la Figura 50.4). En la Norma ISO 5349 la exposición diaria a la vibración se expresa en términos de aceleración continua equivalente ponderada en frecuencia para un período de cuatro horas [ $(a_{h,w})_{eq(4)}$  en  $m/s^2$  r.m.s], de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(a_{h,w})_{eq(4)} = (T/4)^{1/2} (a_{h,w})_{eq(T)}$$

Tabla 50.6 • Valores límite umbral para vibraciones transmitidas a las manos.

Exposición diaria total (horas)	Aceleración eficaz ponderada en frecuencia en la dirección dominante que no debe sobrepasarse	
	$m/s^2$	$g^*$
4-8	4	0,40
2-4	6	0,61
1-2	8	0,81
1	12	1,22

\*  $1g = 9,81 m/s^2$ .

Fuente: Según la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (Conferencia Americana de Higienistas Industriales del Gobierno) 1992.

Tabla 50.7 • Propuesta del Consejo de la Unión Europea para una Directiva del Consejo sobre agentes físicos: Anexo II A. Vibraciones transmitidas a la mano (1994).

Niveles ( $m/s^2$ )	A(8)*	Definiciones
Umbral	1	El valor de exposición por debajo del cual la exposición continua o repetitiva no tiene ningún efecto adverso sobre la salud y la seguridad de los trabajadores
Acción	2,5	El valor por encima del cual deben adoptarse una o más de las medidas** especificadas en los correspondientes Anexos
Valor límite de exposición	5	El valor de exposición por encima del cual una persona no protegida está expuesta a riesgos inaceptables. Está prohibido rebasar este nivel y deberá evitarse implantado las medidas previstas en la Directiva***

\*A(8) = 8 h de aceleración equivalente ponderada en frecuencia.

\*\* Información, formación, medidas técnicas, vigilancia de la salud.

\*\*\* Medidas apropiadas para la protección de la salud y la seguridad.

en donde  $T$  es el tiempo de exposición diario expresado en horas y  $(a_{h,w})_{eq(T)}$  la aceleración continua equivalente ponderada en frecuencia para el tiempo de exposición diario  $T$ . La norma proporciona modificaciones para el cálculo de  $(a_{h,w})_{eq(T)}$  si una jornada de trabajo típica se caracteriza por varias exposiciones de diferente magnitud y duración. El Anexo A de la Norma ISO 5349 (que no forma parte de la norma) propone una relación dosis-efecto entre  $(a_{h,w})_{eq(4)}$  y VWF, que puede calcularse de forma aproximada por medio de la ecuación:

$$C = [(a_{h,w})_{eq(4)} T_F/95]^2 \times 100$$

en donde  $C$  es el percentil de trabajadores expuestos susceptibles de desarrollar VWF (en el rango del 10 al 50 %), y  $T_F$  el tiempo de exposición que transcurre hasta que aparece el amaratamiento de los dedos entre los trabajadores afectados (en el rango de 1 a 25 años). Se utiliza la componente dominante, en un solo eje, de vibración dirigida a la mano para calcular  $(a_{h,w})_{eq(4)}$ , que no deberá exceder de  $50 m/s^2$ . De acuerdo con la relación entre dosis y efecto según ISO, puede esperarse que el VWF aparezca aproximadamente en el 10 % de los trabajadores con exposición diaria a vibración a  $3 m/s^2$  durante diez años.

Para minimizar el riesgo de efectos adversos para la salud inducidos por vibración, otros comités y organizaciones han propuesto niveles de acción y valores límite umbral (TLV) de exposición a la vibración. La American Conference of Government Industrial Hygienists (ACGIH) ha publicado valores TLV de vibración transmitida a las manos medida por el procedimiento de ponderación de frecuencia según la Norma ISO (American Conference of Governmental Industrial Hygienists 1992), (véase la Tabla 50.6). Según la ACGIH, los TLV propuestos se refieren a la exposición a vibraciones a la que "casi todos los trabajadores pueden estar expuestos repetidamente sin pasar de la fase 1 del sistema de clasificación de VWF del Taller de Estocolmo. Más recientemente, la Comisión de las Comunidades Europeas ha presentado niveles de exposición para vibración transmitida a las manos en el marco de una propuesta de Directiva para la protección de los trabajadores contra los riesgos derivados de agentes físicos (Consejo de la Unión Europea 1994), (véase la Tabla 50.7). En la Directiva propuesta, la cantidad utilizada para valorar el riesgo de vibración se

Tabla 50.8 • Magnitudes de aceleración de vibración ponderada en frecuencia ( $m/s^2$  r.m.s.) que es de prever que produzcan dedo blanco por vibración en el 10 % de las personas expuestas\*.

Exposición diaria (horas)	Exposición durante toda la vida (años)					
	0,5	1	2	4	8	16
0,25	256,0	128,0	64,0	32,0	16,0	8,0
0,5	179,2	89,6	44,8	22,4	11,2	5,6
1	128,0	64,0	32,0	16,0	8,0	4,0
2	89,6	44,8	22,4	11,2	5,6	2,8
4	64,0	32,0	16,0	8,0	4,0	2,0
8	44,8	22,4	11,2	5,6	2,8	1,4

\* Con exposición de corta duración, las magnitudes son elevadas y los trastornos vasculares pueden no ser el primer síntoma adverso en aparecer.

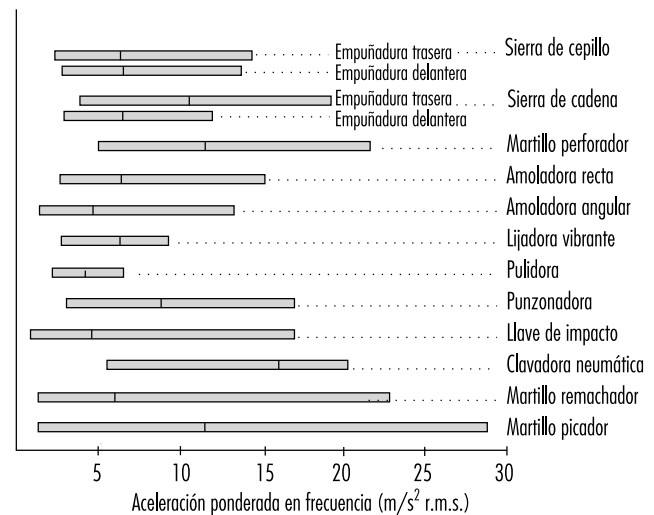
Fuente: Según British Standard 6842. 1987, BSI 1987a.

expresa en términos de aceleración equivalente ponderada en frecuencia para un período de ocho horas,  $A(8) = (7/8)^{1/2} (a_{h,w})_{eq(T)}$ , utilizando la suma vectorial de las aceleraciones ponderadas en frecuencia determinadas en las coordenadas ortogonales  $a_{sum} = (a_{x,h,w}^2 + a_{y,h,w}^2 + a_{z,h,w}^2)^{1/2}$  en la empuñadura de la herramienta o en la pieza vibrantes. Los métodos de medida y evaluación de la exposición a las vibraciones señalados en la Directiva se deriva básicamente de la Norma Británica (BS) 6842 (BSI 1987a). Ahora bien, la Norma BS no recomienda límites de exposición, sino que facilita un apéndice informativo sobre el estado del conocimiento de la relación entre dosis y efecto para las vibraciones transmitidas a las manos. Las magnitudes estimadas de aceleración ponderada en frecuencia que pueden causar VWF en el 10 % de los trabajadores expuestos a vibración según la Norma BS se indican en la Tabla 50.8.

### Medida y evaluación de la exposición

Las medidas de vibración se llevan a cabo para contribuir al desarrollo de nuevas herramientas, comprobar la vibración de las herramientas en el momento de su adquisición, verificar las condiciones de mantenimiento y valorar la exposición humana a la vibración en el lugar de trabajo. El equipo de medida de la vibración consiste generalmente en un transductor (casi siempre un acelerómetro), un dispositivo amplificador, filtro (filtro de paso de banda y/o red de ponderación en frecuencia) e indicador o registrador de amplitud o nivel. Las medidas de vibración deberían realizarse en la empuñadura de la herramienta o en la pieza, cerca de la superficie de la(s) mano(s), donde la vibración penetra en el cuerpo. Para obtener resultados precisos se requiere una cuidadosa selección de los acelerómetros (p. ej., tipo, masa, sensibilidad) y métodos apropiados de montaje del acelerómetro en la superficie vibrante. Las vibraciones transmitidas a las manos deberían medirse y registrarse en las direcciones adecuadas de un sistema de coordenadas ortogonales (véase la Figura 50.4). La medición debería efectuarse sobre un rango de frecuencia de 5 a 1.500 Hz como mínimo, y el contenido de frecuencia de aceleración de la vibración en uno o más ejes puede presentarse en bandas de octava con frecuencias centrales de 8 a 1.000 Hz o en bandas de tercio de octava con frecuencias centrales de 6,3 a 1.250 Hz. También puede expresarse la aceleración como aceleración ponderada en frecuencia utilizando una red de

Figura 50.5 • Valores medios y rango de distribución de la aceleración eficaz ponderada en frecuencia en el eje dominante medida en la(s) empuñadura(s) de algunas herramientas a motor utilizadas en trabajos forestales y en la industria.



Fuente: Asociación Internacional de la Seguridad Social (AISA), Sección Internacional para la Investigación 1989.

ponderación que reúna las características especificadas en las Normas ISO 5349 o BS 6842.

Las medidas en el lugar de trabajo indican que pueden darse magnitudes de vibración y espectros de frecuencia diferentes en herramientas del mismo tipo o cuando se utiliza una misma herramienta de diferente forma. En la Figura 50.5 se refleja el valor medio y el rango de distribución de aceleraciones ponderadas medidas en el eje dominante de herramientas a motor utilizadas en trabajos forestales y en la industria (AISA, Sección Internacional de Investigación 1989). En varias normas la exposición a las vibraciones transmitidas a las manos se valora en términos de cuatro u ocho horas de aceleración equivalente ponderada en frecuencia calculada mediante las ecuaciones anteriores. En el método de obtención de la aceleración equivalente se supone que el tiempo de exposición diaria necesario para producir efectos adversos sobre la salud es inversamente proporcional al cuadrado de la aceleración ponderada en frecuencia (p. ej., si se divide por dos la magnitud de la vibración, el tiempo de exposición puede multiplicarse por cuatro). Tal dependencia temporal se considera razonable a efectos de normalización y es adecuada para la instrumentación, pero hay que señalar que no está totalmente respaldada por datos epidemiológicos (Griffin 1990).

### Prevención

La prevención de lesiones o trastornos causados por vibraciones transmitidas a las manos exige la implantación de procedimientos técnicos, médicos y administrativos (ISO 1986; BSI 1987a). También debería facilitarse asesoramiento adecuado a los fabricantes y usuarios de herramientas vibrantes. Las medidas administrativas deberían incluir una información y formación adecuadas para enseñar a los operarios que trabajan con maquinaria vibrante a adoptar métodos de trabajo correctos y seguros. Dado que se cree que la exposición continua a las vibraciones aumenta el riesgo por vibración, los horarios de trabajo deberían

establecerse incluyendo períodos de descanso. Las medidas técnicas deberían incluir la elección de herramientas con la mínima vibración y con un diseño ergonómico apropiado. Según la Directiva CE para la seguridad de las máquinas (Consejo de las Comunidades Europeas 1989), el fabricante deberá declarar si la aceleración ponderada en frecuencia de la vibración transmitida a las manos excede de  $2,5 \text{ m/s}^2$ , mediante la oportuna determinación por medio de los códigos de ensayo adecuados tal como se indica en la Norma Internacional ISO 8662/1 y los correspondientes documentos para las herramientas específicas (ISO 1988). Las condiciones de mantenimiento de las herramientas deberían comprobarse cuidadosamente mediante medidas periódicas de vibración. Deberían realizarse reconocimientos médicos previos a la realización del trabajo y exámenes clínicos periódicos subsiguientes de los trabajadores expuestos a vibraciones. Los objetivos de la vigilancia médica son informar al trabajador del riesgo potencial asociado con la exposición a las vibraciones, evaluar el estado de salud y diagnosticar precozmente los trastornos inducidos por las vibraciones. En el primer reconocimiento debería prestarse especial atención a cualquier proceso que pueda agravarse por exposición a las vibraciones (p. ej., tendencia constitucional a enfermedad del dedo blanco, algunas formas del fenómeno secundario de Raynaud, daños anteriores en los miembros superiores, trastornos neurológicos). Después de considerar la severidad de los síntomas y las características del proceso de trabajo en su totalidad, debería decidirse entre evitar o reducir la exposición a las vibraciones del trabajador afectado. El trabajador debería ser informado sobre el uso de ropa adecuada para mantener caliente todo el cuerpo y debería evitar o minimizar el consumo de tabaco y el uso de algunos fármacos que pueden afectar la circulación periférica. Los guantes pueden ser útiles para proteger los dedos y las manos de traumatismos y para mantenerlos calientes. Los llamados guantes antivibración pueden proporcionar algo de aislamiento frente a las componentes de alta frecuencia de la vibración producida por algunas herramientas.

## ● MAREO INDUCIDO POR EL MOVIMIENTO

*Alan J. Benson*

El mareo inducido por el movimiento, o cinetosis, no es un proceso patológico, sino una respuesta normal a ciertos estímulos de movimiento con los que el individuo no está familiarizado y a los que, por lo tanto, no se encuentra adaptado; solo son verdaderamente inmunes quienes carecen de aparato vestibular funcional del oído interno.

### ***Movimientos que producen el mareo inducido por el movimiento***

Hay muchos tipos diferentes de movimiento que provocan el síndrome denominado mareo inducido por el movimiento. La mayoría de ellos están relacionados con medios de locomoción—en particular, barcos, aerodeslizadores, aviones, automóviles y trenes, y con menor frecuencia, elefantes y camellos. Las complejas aceleraciones generadas por atracciones mecánicas de feria tales como columpios, tirovivos, montañas rusas, etc., pueden provocar intenso mareo. Además, muchos astronautas/cosmonautas padecen mareo (mareo espacial) cuando efectúan movimientos con la cabeza por primera vez en el entorno, sometido a fuerzas anormales (ingravedez) del vuelo orbital. También producen el síndrome del mareo ciertos estímulos visuales en movimiento, sin ningún movimiento físico del observador; son

ejemplos de ello la visualización del mundo visual externo de los simuladores de base fija (mareo en simulador) o la proyección en pantalla gigante de escenas filmadas de un vehículo en movimiento (mareo en Cinerama o en IMAX).

### ***Etiología***

La característica esencial de los estímulos que producen mareo inducido por el movimiento es que éstos generan información discordante en los sistemas sensoriales que suministran al cerebro información acerca de la orientación espacial y el movimiento del cuerpo. El aspecto principal de esta discordancia es una desadaptación entre las señales suministradas, principalmente, por los ojos y el oído interno, y las que el sistema nervioso central “espera” recibir y que estén correlacionadas.

Pueden distinguirse varias categorías de desadaptación. La desadaptación más importante es la de las señales procedentes del aparato vestibular (laberinto) del oído interno, en el que los canales semicirculares (los receptores especializados de las aceleraciones angulares) y los otolitos (los receptores especializados de las aceleraciones lineales) no suministran información concordante. Por ejemplo, cuando se efectúa un movimiento de cabeza en un coche o un avión que está girando, los canales semicirculares y los otolitos son estimulados de manera atípica y suministran información errónea e incompatible, que difiere sustancialmente de la generada por ese mismo movimiento de cabeza en un entorno estable, de gravedad 1-G. De igual modo, las aceleraciones lineales de baja frecuencia (inferior a 0,5 Hz), como las que se producen a bordo de un barco en aguas agitadas o en un avión que atraviesa una turbulencia, generan también señales vestibulares contradictorias y, por lo tanto, son una causa potencial de mareo.

También puede ser un factor contribuyente importante el desacuerdo de la información visual y vestibular. Es más probable que se maree el ocupante de un vehículo en movimiento que no puede ver el exterior que uno que dispone de una buena referencia visual externa. El pasajero que viaja bajo cubierta o en la cabina de un avión percibe el movimiento del vehículo mediante claves vestibulares, pero solo recibe información visual de su movimiento relativo dentro del vehículo. También la ausencia de una señal “esperada” y concordante en una modalidad sensorial determinada se considera la característica esencial del mareo inducido visualmente, dado que las claves visuales de movimiento no van acompañadas de las señales vestibulares que el individuo “espera” que se produzcan cuando está sometido al movimiento indicado por la presentación visual.

### ***Síntomas***

Ante la exposición al movimiento provocador, los signos y síntomas de mareo evolucionan en una secuencia determinada, en la que la escala temporal depende de la intensidad de los estímulos de movimiento y de la susceptibilidad del individuo. Hay, desde luego, considerables diferencias entre unos y otros individuos, no solo de susceptibilidad sino también en el orden de aparición de determinados signos y síntomas, o en la total ausencia de éstos. Normalmente, el primer síntoma es malestar epigástrico, seguido de náuseas, palidez y transpiración, y suele ir acompañado de una sensación de calor corporal, aumento de la secreción de saliva y eructos (flato). Normalmente estos síntomas evolucionan con relativa lentitud, pero si continúa la exposición al movimiento se produce un rápido deterioro del bienestar y aumenta la intensidad de las náuseas, que finalmente desembocan en vómito o arcadas. El vómito puede proporcionar alivio pero lo más probable es que éste dure poco a menos que cese el movimiento.

El síndrome de mareo tiene también otras características más variables. Un síntoma de temprana aparición puede ser la alteración del ritmo respiratorio, con suspiros y bostezos, y también puede producirse hiperventilación, sobre todo en personas a quienes la causa o consecuencia de su discapacidad les provoca ansiedad. Se comunican casos de dolor de cabeza, tinnitus (campanilleo) y vértigo, mientras que la apatía y la depresión son frecuentes en quienes padecen malestar agudo, y pueden ser de tal intensidad que lleguen a descuidarse la seguridad personal y la supervivencia. Tras el cese del movimiento provocador de mareo puede imponerse una sensación de letargo y somnolencia, siendo éstos a veces los únicos síntomas en situaciones en las que la adaptación al movimiento inhabitual se produce sin malestar.

### Adaptación

Con la exposición continuada o repetida a un determinado movimiento provocador de mareo, la mayoría de los individuos experimentan una reducción de la severidad de los síntomas; normalmente después de tres o cuatro días de exposición continua (por ejemplo a bordo de un barco o en un vehículo espacial) se han adaptado al movimiento y pueden realizar sus tareas habituales sin discapacidad. En relación con el modelo de "discordancia", esta adaptación o habituación representa el establecimiento de una nueva serie de "expectativas" en el sistema nervioso central. Ahora bien, al regresar a un entorno familiar, estas expectativas dejarán de ser adecuadas y puede que se repitan los síntomas de mareo (*mareo del desembarque*) hasta que se produzca la readaptación. Los individuos difieren considerablemente en su velocidad de adaptación, en la forma de mantener ésta y en el grado en que pueden generalizar la adaptación protectora de un entorno de movimiento a otro. Lamentablemente, una pequeña proporción de la población (probablemente alrededor del 5 %) no consigue adaptarse o lo hace con tal lentitud que continúa experimentando síntomas durante todo el período de exposición al movimiento provocador de mareo.

### Incidencia

La incidencia de mareo en un determinado entorno de movimiento depende de varios factores, en particular

- las características físicas del movimiento (su intensidad, frecuencia y dirección de actuación)
- la duración de la exposición;
- la susceptibilidad intrínseca del individuo;
- la tarea que se realiza,
- otros factores ambientales (p. ej., el olor).

No es de extrañar, por lo tanto, que la incidencia de mareo varíe ampliamente entre los diferentes entornos de movimiento. Por ejemplo: casi todos los ocupantes de lanchas salvavidas en mar agitado vomitan; el 60 % de los alumnos que se preparan para tripular aviones sufren mareo en algún momento durante su entrenamiento, mareo que en el 15 % de los casos es lo bastante intenso para perturbar su proceso de formación; en contraste, menos del 0,5 % de los pasajeros de aviones de transporte civiles resultan afectados, aunque la incidencia es mayor al volar a baja altitud y con turbulencia en aviones pequeños de itinerario pendular.

Estudios de laboratorio y de campo han evidenciado que en el caso del movimiento oscilatorio lineal vertical (o elevación vertical rápida), la oscilación a una frecuencia de aproximadamente 0,2 Hz es la más provocadora de mareo (véase la Figura 50.6). Con una intensidad de oscilación (aceleración pico) dada, la incidencia de mareo disminuye con gran rapidez al aumentar la frecuencia por encima de 0,2 Hz; el potencial provocador de mareo del movimiento a 1 Hz es menos de la

décima parte que a 0,2 Hz. Lo mismo sucede con el movimiento a frecuencias inferiores a 0,2 Hz, aunque la relación entre incidencia y frecuencia no está bien definida debido a la falta de datos experimentales; desde luego, un entorno estable de 1-G y frecuencia cero no provoca mareo.

Las relaciones establecidas entre la incidencia de los síntomas de mareo y la frecuencia, magnitud y duración del movimiento de elevación vertical rápida (eje  $z$ ) han conducido al desarrollo de fórmulas sencillas que permiten predecir la incidencia cuando se conocen los parámetros físicos del movimiento. El concepto, plasmado en la Norma Británica 6841 (BSI 1987b) y en el proyecto de Norma Internacional ISO 2631-1, es que la incidencia de los síntomas es proporcional al Valor de la Dosis de Mareo ( $MSDV_z$ ). El  $MSDV_z$  (en  $m/s^{1.5}$ ) se define como sigue:

$$MSDV_z = (a^2 t)^{1/2}$$

en donde  $a$  es el valor medio cuadrático o valor eficaz (r.m.s.), de la aceleración ponderada en frecuencia (en  $m/s^2$ ) determinada por integración lineal sobre la duración,  $t$  (en segundos), de la exposición al movimiento.

La ponderación de frecuencia que debe aplicarse a la aceleración del estímulo es un filtro con una frecuencia central y características de atenuación similares a las representadas en la Figura 50.6. La función de ponderación está definida con exactitud en las normas.

El porcentaje de una población adulta inadaptada ( $P$ ) con probabilidad de sufrir vómito viene dada por:

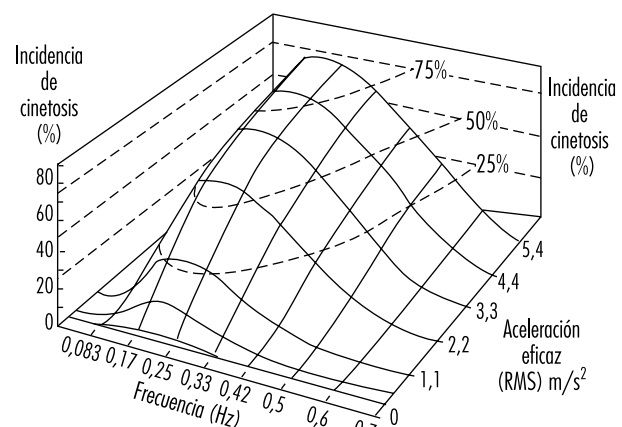
$$P = 1/3 MSDV_z$$

El  $MSDV_z$  puede utilizarse asimismo para predecir el nivel de malestar. En una escala de cuatro puntos, de cero (me siento perfectamente) a tres (me siento fatal) la "clasificación de enfermedad" ( $I$ ) viene dada por:

$$I = 0,02 MSDV_z$$

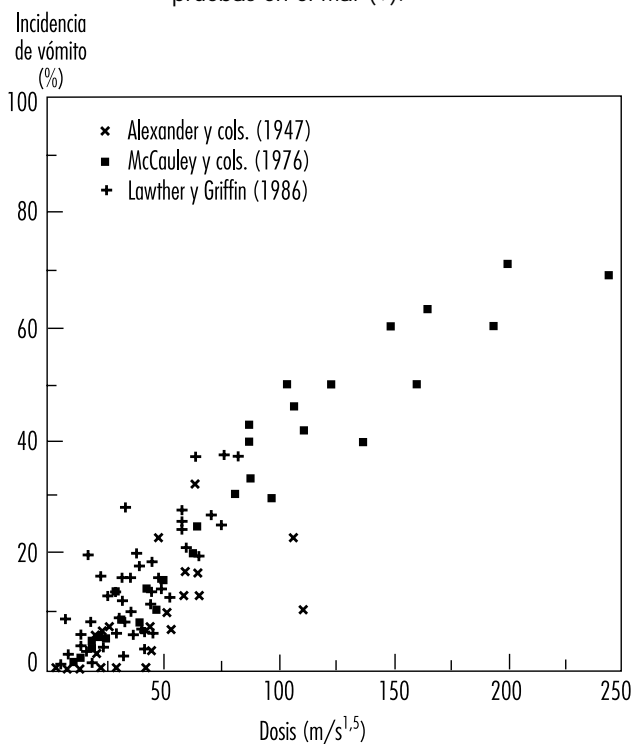
Teniendo en cuenta las grandes diferencias entre individuos en cuanto a su susceptibilidad al mareo, la relación entre  $MSDV_z$  y la producción de vómito en experimentos de laboratorio y en pruebas en el mar (véase la Figura 50.7) es aceptable. Hay que señalar que las fórmulas se desarrollaron a partir de datos adquiridos en exposiciones de duración comprendida entre unos 20 minutos y seis horas, habiéndose producido el

Figura 50.6 • Incidencia de cinetosis en función de la frecuencia de onda y la aceleración para 2 horas de exposición a movimiento senoidal vertical.



Fuente: McCauley y cols. 1976.

Figura 50.7 • Relación entre incidencia de vómito y dosis de estímulo ( $MSDV_2$ ), calculada por el procedimiento descrito en el texto. Datos procedentes de experimentos de laboratorio con oscilación vertical (x ■) y pruebas en el mar (+).



vómito hasta en el 70 % de individuos (la mayoría sentados) expuestos a movimiento de elevación rápida vertical.

El conocimiento que se posee de la efectividad de la oscilación lineal que actúa en otros ejes corporales y en direcciones distintas de la vertical, es relativo. Hay alguna evidencia, obtenida en experimentos de laboratorio con grupos pequeños de sujetos, de que la oscilación lineal en un plano horizontal provoca más mareo, aproximadamente el doble, que la oscilación vertical de igual intensidad y frecuencia en sujetos sentados, pero menos, en la misma proporción, cuando el sujeto está en posición supina y el estímulo actúa en el eje longitudinal ( $Z$ ) del cuerpo. Por lo tanto, la aplicación de fórmulas y características de ponderación plasmadas en las normas respecto a la predicción de la incidencia de mareo, deberá realizarse con precaución y teniendo debidamente en cuenta las limitaciones antes señaladas.

La considerable variabilidad entre individuos en cuanto a su respuesta al movimiento provocador, es una característica importante del mareo. Las diferencias de susceptibilidad pueden estar relacionadas, en parte, con factores constitucionales. Los niños de edad muy inferior a unos dos años rara vez resultan afectados, pero con el crecimiento, la susceptibilidad aumenta rápidamente hasta alcanzar un valor máximo entre los cuatro y los diez años. A partir de entonces la susceptibilidad disminuye

progresivamente, por lo que los mayores son menos propensos a verse afectados, aunque no son inmunes. Cualquiera que sea el grupo de edad, las mujeres son más sensibles que los hombres; los datos de incidencia sugieren una relación aproximada de 1,7:1. Se ha demostrado también que ciertas dimensiones de la personalidad, tales como la neurosis, la introversión y el estilo perceptual están correlacionadas, aunque débilmente, con la susceptibilidad. El mareo puede ser también una respuesta condicionada y una manifestación de ansiedad fóbica.

### Medidas preventivas

Existen procedimientos que reducen al mínimo el estímulo provocador de mareo o aumentan la tolerancia. Pueden prevenir el mareo en una determinada proporción de la población, pero ninguno, exceptuando la retirada del entorno de movimiento, es eficaz al 100 %. Al diseñar un vehículo, es beneficioso tener en cuenta los factores que elevan la frecuencia y reducen la magnitud de las oscilaciones (véase la Figura 50.6) que experimentan los ocupantes durante el funcionamiento normal. La provisión de apoyo para la cabeza y sujeción corporal para minimizar los movimientos de cabeza innecesarios es ventajosa, y se ve reforzada si el ocupante puede adoptar una posición reclinada o de supinación. El mareo es menos intenso si el ocupante puede ver el horizonte; para quienes carecen de una referencia visual externa, cerrar los ojos reduce la discordancia visual/vestibular. También ayuda concentrarse en una tarea, especialmente el control del vehículo. Aunque estas medidas pueden aportar ventajas inmediatas, a la larga lo más beneficioso es desarrollar una adaptación protectora. Se consigue mediante una exposición continuada y repetida al entorno de movimiento, aunque puede facilitarse con ejercicios en tierra, en los que los estímulos provocadores de mareo se generan realizando movimientos con la cabeza mientras se gira en una mesa rotativa (tratamiento de desensibilización).

Hay varios fármacos que aumentan la tolerancia, aunque todos tienen efectos secundarios (en particular, sedación), por lo que no deben usarse cuando se ha de controlar un vehículo o es indispensable actuar con un rendimiento óptimo. Para una profilaxis a corto plazo (menos de cuatro horas), se recomienda de 0,3 a 0,6 mg de bromhidrato de hioscina (escopolamina); los antihistamínicos, clorhidrato de prometacina (25 mg), clorhidrato de meclocina (50 mg), dimenhidrinato (50 mg) y cinaricina (30 mg) tienen una acción más duradera. La combinación de hioscina o prometacina con 25 mg de sulfato de efedrina aumenta el poder profiláctico al tiempo que reduce algo los efectos secundarios. Se puede conseguir un efecto profiláctico de hasta 48 horas utilizando un parche de escopolamina, que permite absorber lentamente el fármaco a través de la piel a una velocidad controlada. No se consiguen concentraciones efectivas del fármaco en el organismo hasta después de seis a ocho horas de la aplicación del parche, por lo que es preciso prever por anticipado la necesidad de este tipo de tratamiento.

### Tratamiento

A quienes padezcan de mareo crónico con vómitos debe colocárseles, a ser posible, en una posición en que el estímulo de movimiento se reduzca al mínimo, y administrárseles un fármaco contra el mareo, preferiblemente prometacina inyectada. En caso de vómitos prolongados y repetidos, puede ser necesaria la reposición de líquido y electrolitos por vía intravenosa.



## Referencias

- Alexander, SJ, M Cotzin, JB Klee, GR Wendt. 1947. Studies of motion sickness XVI: The effects upon sickness rates of waves and various frequencies but identical acceleration. *J Exp Psy* 37:440-447.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). 1992. Hand-arm (segmental) vibration. En *Threshold Limit Values and Biological Exposures Indices for 1992-1993*. Cincinnati, Ohio: ACGIH.
- Bongers, PM, HC Boshuizen. 1990. *Back Disorders and Whole-Body Vibration at Work*. Tesis. Amsterdam: Universidad de Amsterdam.
- British Standards Institution (BSI). 1987a. *Measurement and Evaluation of Human Exposure to Vibration Transmitted to the Hand*. BS 6842. Londres: BSI.
- . 1987b. *Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Mechanical Vibration and Repeated Shock*. BS 6841. Londres: BSI.
- Consejo de la Comunidad Europea (CCE). 1989. Directiva del Consejo de 14 de junio de 1989 relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados Miembros sobre máquinas. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas* L 183:9-32.
- Consejo de la Unión Europea. 1994. Propuesta modificada de una Directiva del Consejo relativa a los requisitos mínimos de salud y seguridad con respecto a la exposición de los trabajadores a riesgos derivados de agentes físicos. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas* C230 (19 de agosto):3-29.
- Dupuis, H, G Zerlett. 1986. *The Effects of Whole-Body Vibration*. Berlín: Springer-Verlag.
- Griffin, MJ. 1990. *Handbook of Human Vibration*. Londres: Academic Press.
- Hamilton, A. 1918. *A Study of Spastic Anemia in the Hands of Stonecutters*. Industrial Accidents and Hygiene Series no. 19. Bulletin No. 236. Washington, DC: Department of Labor Statistics.
- Hasan, J. 1970. Biomedical aspects of low-frequency vibration. *Work Environ Health* 6(1):19-45.
- Lawther, A, MJ Griffin. 1986. Prediction of the incidence of motion sickness from the magnitude, frequency and duration of vertical oscillation. *J Acoust Soc Am* 82:957-966.
- McCauley, ME, JW Royal, CD Willie, JF O'Hanlon, RR Mackie. 1976. *Motion Sickness Incidence: Exploratory Studies of Habituation Pitch and Roll, and the Refinement of a Mathematical Model*. Technical Report No. 1732-2. Goleta, California: Human Factors Research.
- Organización Internacional de Normalización (ISO). 1974. *Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration*. Ginebra: ISO.
- . 1985. *Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration. Part 1: General Requirements*. ISO 2631/1. Ginebra: ISO.
- . 1986. *Mechanical Vibration-Guidelines for the Measurement and the Assessment of Human Exposure to Hand-Transmitted Vibration*. ISO 5349. Ginebra: ISO.
- . 1988. *Hand-Held Portable Power Tools - Measurement of Vibrations at the Handle. Part 1: General*. ISO 8662/1. Ginebra: ISO.
- Rumjancev, GI. 1966. *Gigiena truda v proizvodstve sbornogo shelezobetona* [Higiene industrial en la producción de hormigón armado]. *Medicina* (Moscú):1-128.
- Schmidt, M. 1987. *Die gemeinsame Einwirkung von Lärm und Ganzkörpervibration und deren Auswirkungen auf den Höverlust bei Agrotechnikern*. *Dissertation* A. Halle, Alemania: Landwirtschaftliche Fakultät der Martin-Luther-Universität.
- Sección Internacional de Investigación de la AISS. 1989. *Vibration At Work*. Paris: INRS.
- Seidel, H, R Blüthner, J Martin, G Menzel, R Panuska, P Ullsperger. 1992. Effects of isolated and combined exposures to whole-body vibration and noise on auditory-event related brain potentials and psychophysical assessment. *Eur J Appl Physiol Occup Phys* 65:376-382.
- Seidel, H, R Heide. 1986. Long-term effects of whole-body vibration: A critical survey of the literature. *Int Arch Occup Environ Health* 58:1-26.
- Seidel, H. 1975. Systematische Darstellung physiologischer Reaktionen auf Ganzkörperschwingungen in vertikaler Richtung (Z-Achse) zur Ermittlung von biologischen Bewertungsparametern. *Ergonom Berichte* 15:18-39.
- Seminario de Estocolmo 86. 1987. Symptomatology and diagnostic methods in the hand-arm vibration syndrome. *Scand J Work Environ Health* 13:271-388.

## Otras lecturas recomendadas

- Benson, AJ. 1988. Motion sickness. En *Aviation Medicine*, dirigido por J Ernsting y P King. Londres: Butterworths.
- Reason, JT, JJ Brand. 1975. *Motion Sickness*. Londres: Academic Press.

