

EXPOSICIÓN A VIBRACIONES EN EL LUGAR DE TRABAJO



INSTITUTO NACIONAL
DE SEGURIDAD E HIGIENE
EN EL TRABAJO

EXPOSICIÓN A VIBRACIONES EN EL LUGAR DE TRABAJO

MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES
INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD
E HIGIENE EN EL TRABAJO

Autores:

Carretero Ruiz, Rosa María.- I.N.S.H.T.- Madrid
López Muñoz, Gerardo.- I.N.S.H.T.- Madrid

Diseño de la cubierta:

Manuel Ruiz Polo y Jaime Rex.
Servicio de Ediciones y Publicaciones I.N.S.H.T. - Madrid

Edita:

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo
c/ Torrelaguna, 73 - 28027 - MADRID

Composición e impresión:

Servicio de Ediciones y Publicaciones I.N.S.H.T. MADRID

I.S.B.N.: 84-7425-449-3
Dep. Legal: M-37383-96
N.I.P.O.: 211-96-020-0

PRESENTACIÓN

En los últimos años ha crecido la preocupación por la necesidad de reducir el efecto que puede tener, sobre los trabajadores expuestos, una exposición prolongada y de alto nivel a vibraciones.

La utilización de herramientas a motor portátiles, que expongan a los trabajadores que las manejan a altos niveles de vibración, puede ser origen de trastornos vasculares en las manos, caracterizadas por una palidez intermitente de los dedos y conocido como “dedo blanco inducido por vibraciones”.

Por otra parte, la exposición a vibración de cuerpo completo, como sucede en actividades tales como conductores de vehículos todo terreno (maquinaria de obras públicas, tractores, etc.), conductores de carretillas elevadoras, etc., puede originar daños en la zona lumbar de la columna vertebral y en el sistema nervioso conectado a ella.

La Unión Europea, sensible a esta problemática, está elaborando un proyecto de Directiva de Agentes Físicos, mediante el cual se pretende regular la exposición a diversos agentes, entre los que se hallan las vibraciones. Además, la Directiva Máquinas 89/392/CEE reconoce que la reducción de la emisión de vibraciones es una parte integral de la seguridad de las máquinas y, por ello, obliga al fabricante a diseñar y construir la máquina de forma que los riesgos derivados de la exposición a vibraciones sean los menores posibles.

Por otra parte la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales establece el derecho de los trabajadores a una protección eficaz en materia de seguridad y salud en el trabajo. Para ello obliga a planificar la acción preventiva en la empresa a partir de una evaluación inicial de los riesgos.

El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, consciente de la problemática que supone la medida y evaluación de los riesgos derivados de la exposición a vibraciones, pone este libro a disposición de los distintos colectivos relacionados con la prevención de riesgos laborales, con la confianza de que pueda servir de apoyo a la hora de medir, evaluar y controlar dichos riesgos.

Finalmente agradecer a los autores y otros colaboradores del Centro Nacional de Nuevas Tecnologías del I.N.S.H.T. el esfuerzo realizado para la elaboración y publicación de este libro.

Javier Gómez-Hortigüela Amillo

Director del I.N.S.H.T.

Noviembre 1996

ÍNDICE

pag

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.0 INTRODUCCIÓN	19
1.1 OBJETIVO	21
1.2 CONTENIDO	21

CAPÍTULO 2: CONCEPTOS BÁSICOS DE VIBRACIONES

2.0 INTRODUCCIÓN	25
2.1 ECUACIÓN DE UN MUELLE	25
2.2 SISTEMA NO AMORTIGUADO CON UN GRADO DE LIBERTAD. VIBRACIÓN LIBRE	26
2.3 ECUACIÓN DE UN AMORTIGUADOR VISCOSO	30
2.4 SISTEMA AMORTIGUADO CON UN GRADO DE LIBERTAD. VIBRACIÓN LIBRE	31
2.4.1 SISTEMAS SUBAMORTIGUADOS	33
2.4.2 SISTEMAS SOBREAMORTIGUADOS Y CRÍTICAMENTE AMORTIGUADOS. AMORTIGUAMIENTO CRÍTICO	35
2.4.3 FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO. CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS AMORTIGUADOS CON UN GRADO DE LIBERTAD EN VIBRACIÓN LIBRE	36

2.5	SISTEMA AMORTIGUADO CON UN GRADO DE LIBERTAD. VIBRACIÓN FORZADA	37
2.6	RESONANCIA	40
2.7	TRANSMISIBILIDAD	42
2.8	AISLAMIENTO	45
2.9	MODELO MECÁNICO DEL CUERPO HUMANO	47
2.10	TRANSMISIÓN DE LA VIBRACIÓN A TRAVÉS DEL CUERPO	48
2.11	PARÁMETROS DE MEDIDA DE LA VIBRACIÓN	53
2.12	CUANTIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE VIBRACIÓN ..	58
2.12.1	VALOR EFICAZ (RMS)	58
2.12.1.1	Aceleración rms promediada exponencialmente.	59
2.12.1.2	Aceleración continua equivalente.	61
2.12.2	VALOR PICO MÁXIMO Y FACTOR DE CRESTA ...	62
2.12.3	LA ESCALA LOGARÍTMICA. EL DECIBELIO	63
2.12.3.1	Nivel de aceleración rms promediada exponencialmente.	65
2.12.3.2	Nivel de aceleración continuo equivalente.	65
2.12.3.3	Suma de aceleraciones en dB.	66
2.13	VALORES ENCONTRADOS EN LAS VIBRACIONES QUE AFECTAN A LOS SERES HUMANOS	67

CAPÍTULO 3: MEDIDA DE LAS VIBRACIONES

3.0	INTRODUCCIÓN	71
3.1	VIBRÓMETROS	71
3.2	ELEMENTOS COMPONENTES DE UN VIBRÓMETRO	72

3.2.1	ACELERÓMETRO	72
3.2.1.1	Funcionamiento.	72
3.2.1.2	Características de los acelerómetros piezoeléctricos.	75
3.2.1.2.1	Sensibilidad.	75
3.2.1.2.2	Masa del acelerómetro.	76
3.2.1.2.3	Rango dinámico.	77
3.2.1.2.4	Respuesta en frecuencia de un acelerómetro. ...	78
3.2.1.2.5	Sensibilidad transversal del acelerómetro.	82
3.2.1.3	Tipos de acelerómetros piezoeléctricos.	83
3.2.1.4	Influencias ambientales.	84
3.2.1.4.1	Temperatura.	84
3.2.1.4.2	Ruido de fricción.	85
3.2.1.5	Calibración de los acelerómetros.	85
3.2.2	AMPLIFICADOR	86
3.2.2.1	Amplificador de carga.	86
3.2.3	FILTROS PASO ALTO Y PASO BAJO	87
3.2.4	REDES DE PONDERACIÓN EN FRECUENCIA	87
3.2.5	FILTROS DE OCTAVA Y TERCIO DE OCTAVA	93
3.2.5.1	Filtro paso banda.	93
3.2.6	PROMEDIADO EN TIEMPO DE LA SEÑAL. RECTIFICADOR. CIRCUITO RMS	94
3.2.7	INDICADOR	96
3.2.8	ANÁLISIS MÁS DETALLADO DE LA SEÑAL DE VIBRACIÓN	97
3.2.9	NORMAS DE CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE EQUIPOS DE MEDIDA	98

CAPÍTULO 4: VIBRACIONES MANO-BRAZO

4.0	INTRODUCCIÓN	101
4.1	EFFECTOS DE LA EXPOSICIÓN A VIBRACIÓN MANO-BRAZO	101
4.2	CARACTERIZACIÓN DE LA VIBRACIÓN MANO-BRAZO	106
4.2.1	DIRECCIÓN DE LA VIBRACIÓN	107
4.2.2	AMPLITUD DE LA VIBRACIÓN	108
4.3	MEDIDA Y EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LA VIBRACIÓN MANO-BRAZO	110
4.3.1	MEDIDA DE LA VIBRACIÓN MANO-BRAZO	110
4.3.1.1	Equipo de medida de la vibración mano-brazo.	110
4.3.1.2	Medida del valor eficaz.	111
4.3.1.3	Colocación y montaje de los acelerómetros.	111
4.3.1.4	Magnitudes que deben ser medidas.	115
4.3.1.5	Duración de la medida.	115
4.3.1.6	Acoplamiento de la mano a la fuente vibratoria. ...	116
4.4	EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LA VIBRACIÓN MANO-BRAZO	116
4.4.1	EXPOSICIÓN DIARIA	116
4.4.1.1	Cálculo de la aceleración continua equivalente para un período de 4 horas, cuando se conoce la aceleración continua equivalente para un período distinto de 4 h.	117
4.4.1.2	Cálculo de la aceleración continua equivalente total ponderada en frecuencia si la exposición diaria total comprende varias exposiciones de diferentes amplitudes y duraciones.	118
4.4.2	VIBRACIÓN MULTIAXIAL	119

4.4.3	CONVERSIÓN DE ACELERACIONES MEDIDAS EN BANDAS DE OCTAVA Y DE TERCIOS DE OCTAVA A ACELERACIÓN PONDERADA EN FRECUENCIA	119
4.4.4	NIVEL DE ACELERACIÓN EN dB	121
4.4.4.1	Cálculo del nivel de aceleración equivalente para un período de 4 horas cuando se conoce el nivel de aceleración para un período distinto de 4 h.	121
4.4.4.2	Cálculo del nivel de aceleración total ponderado en frecuencia si la exposición diaria total comprende varias exposiciones de diferentes amplitudes y duraciones.	122
4.4.4.3	Conversión de niveles de aceleración medidos en bandas de octava y de tercios de octava a nivel de aceleración ponderada en frecuencia.	122
4.4.5	RELACIÓN DOSIS-EFECTO	123
4.5	MEDIDAS PREVENTIVAS	125
4.5.1	CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LOS GUANTES ANTIVIBRATORIOS	127
4.6	LEGISLACIÓN COMUNITARIA. PROPUESTA MODIFICADA DE DIRECTIVA DE AGENTES FÍSICOS ...	128
4.6.1	RIESGO	128
4.6.2	VALORES	129
4.6.3	ACTIVIDADES CON RIESGO INCREMENTADO ...	129
4.6.4	MEDICIÓN Y EVALUACIÓN	130
4.6.5	REDUCCIÓN DEL RIESGO	130
4.6.6	EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL	131
4.6.7	INFORMACIÓN Y FORMACIÓN	131
4.6.8	VIGILANCIA DE LA SALUD	131

4.6.9 EQUIPOS DE TRABAJO	131
4.6.10 INTERFERENCIAS	131
4.6.11 RIESGOS INDIRECTOS	132

CAPÍTULO 5: VIBRACIONES DE CUERPO COMPLETO

5.0 INTRODUCCIÓN	135
5.1 MEDIDA Y EVALUACIÓN DE LA VIBRACIÓN DE CUERPO COMPLETO	138
5.1.1 MEDIDA DE LA VIBRACIÓN (CON RESPECTO A LOS EFECTOS SOBRE LA SALUD)	139
5.1.1.1 Símbolos y subíndices.	139
5.1.1.2 Unidades de aceleración.	139
5.1.1.3 Dirección de la medida.	140
5.1.1.4 Localización de la medida.	141
5.1.1.5 Requisitos generales para el acondicionamiento de la señal.	142
5.1.1.6 Duración de la medida.	142
5.1.1.7 Parámetro básico de medida: aceleración rms ponderada en frecuencia.	143
5.1.1.8 Otros parámetros adicionales de medida.	146
5.1.1.9 Ponderación de frecuencia.	148
5.1.1.10 Combinación de vibraciones en más de una dirección.	149
5.1.2 EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS SOBRE LA SALUD	149
5.1.2.1 Utilización de la aceleración rms ponderada en frecuencia.	150
5.1.2.2 Método de evaluación cuando el método básico no es suficiente.	152

5.2	PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN DE LOS TRABAJADORES FRENTE A LOS RIESGOS DERIVADOS DE LA EXPOSICIÓN A VIBRACIONES DE CUERPO COMPLETO	153
5.2.1	EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS E IMPLANTACIÓN DE LAS MEDIDAS DE CONTROL NECESARIAS	154
5.2.1.1	Determinar si la VCC es un peligro.	155
5.2.1.2	Medida de la vibración de cuerpo completo.	155
5.2.1.3	Evaluación de la vibración de cuerpo completo.	156
5.2.1.4	Reducción de la exposición.	157
5.2.1.4.1	Reducción de la exposición mediante medidas técnicas de control.	157
5.2.1.4.1.1.	Reducción de las vibraciones en su origen.	158
5.2.1.4.1.2	Disminución de la transmisión de las vibraciones a los conductores intercalando dispositivos de suspensión entre el conductor y la fuente.	159
5.2.1.4.1.3	Disminución del efecto de las vibraciones mejorando la postura de trabajo.	164
5.2.1.4.2	Reducción de la exposición mediante medidas administrativas.	165
5.2.1.5	Evaluación periódica.	165
5.2.2	EVALUACIÓN DE LA SALUD DE LOS TRABAJADORES EXPUESTOS	166
5.2.3	FORMACIÓN E INFORMACIÓN A LOS TRABAJADORES EXPUESTOS	166
5.3	LEGISLACIÓN COMUNITARIA. PROPUESTA MODIFICADA DE DIRECTIVA DE AGENTES FÍSICOS ...	167
5.3.1	RIESGO	167
5.3.2	VALORES	168

5.3.3	ACTIVIDADES CON RIESGO INCREMENTADO . . .	169
5.3.4	MEDICIÓN Y EVALUACIÓN	169
5.3.5	REDUCCIÓN DEL RIESGO	170
5.3.6	EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL	170
5.3.7	INFORMACIÓN Y FORMACIÓN	171
5.3.8	VIGILANCIA DE LA SALUD	171
5.3.9	EXTENSIÓN DE LA EXPOSICIÓN	171
5.3.10	INTERFERENCIAS	171
5.3.11	RIESGOS INDIRECTOS	172

CAPÍTULO 6: LA NORMATIVA SOBRE VIBRACIONES

6.0	INTRODUCCIÓN	175
6.1	DISPOSICIONES SOBRE VIBRACIONES	175
6.2	DISPOSICIONES SOBRE EXPOSICIÓN A VIBRACIONES	176
6.2.1	LEY DE PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES	176
6.2.2	PROPUESTA DE DIRECTIVA DE AGENTES FÍSICOS	181
6.3	DISPOSICIONES SOBRE EMISIÓN DE VIBRACIONES . . .	181
6.3.1	REGLAMENTO DE MÁQUINAS 1435/1992	181
6.3.1.1	Requisitos esenciales de seguridad (RES) sobre vibraciones establecidos en la Directiva Máquinas.	182
6.4	NORMAS DE APOYO PARA TRATAR LAS VIBRACIONES EN LA DIRECTIVA MÁQUINAS	186

6.4.1	ORGANISMOS DE NORMALIZACIÓN INTERNACIONALES, EUROPEOS Y NACIONALES	186
6.4.1.1	Normalización internacional.	186
6.4.1.2	Normalización europea.	187
6.4.1.3	Normalización nacional.	188
6.4.1.4	Tipos de normas.	188
6.5	UTILIZACIÓN DE LAS NORMAS A LA HORA DE FABRICAR UNA MÁQUINA QUE GENERE VIBRACIONES Y QUE TENGA QUE CUMPLIR LO ESTABLECIDO EN EL REGLAMENTO DE MÁQUINAS ..	189
6.6	NORMAS TÉCNICAS SOBRE VIBRACIONES	193
6.6.1	VIBRACIÓN MANO-BRAZO	193
6.6.1.1	Normas para medida y evaluación (Normas B). ...	193
6.6.1.2	Guías para la elaboración de Normas C.	194
6.6.1.3	Normas para la reducción de la vibración.	195
6.6.1.4	Códigos de ensayo de vibraciones (Normas C). ...	195
6.6.1.5	Normas para equipos de protección individual. ...	196
6.6.1.6	Informes CEN.	197
6.6.1.7	Otras normas.	197
6.6.2	VIBRACIÓN DE CUERPO COMPLETO	198
6.6.2.1	Normas para medida y evaluación (Normas B). ...	198
6.6.2.2	Guías para la elaboración de Normas C.	199
6.6.2.3	Normas para la reducción de la vibración.	199
6.6.2.4	Códigos de ensayo de vibraciones (Normas C). ...	200
6.6.2.5	Normas para equipos de protección individual. ...	200
6.6.2.6	Informes CEN.	200
6.6.2.7	Otras normas.	200
	BIBLIOGRAFÍA	202

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.0 INTRODUCCIÓN

Los efectos de las vibraciones y choques sobre los seres humanos se conocen desde hace mucho tiempo. A comienzos del siglo XVIII, B. Ramazzini en su libro “Examen de las enfermedades de los artistas y artesanos” observó las cargas y tensiones en domadores de caballos producidas por vibraciones mecánicas y describió los efectos de la siguiente manera: “... la fuerza de la vibración sacude las entrañas y prácticamente las desplaza de su posición normal...”.

En todos los sectores (industrial, agrícola, construcción y servicios) se utilizan, hoy en día, herramientas a motor portátiles que exponen las manos de los trabajadores que las manejan a niveles excesivos de vibración. Entre ellas se encuentran: sierras de cadena, martillos rompedores de pavimentos, taladros percutores, buriladores, amoladoras, llaves de impacto, remachadoras, martillos de agujas, etc. A este tipo de vibración se la denomina **vibración mano-brazo**.

La exposición prolongada a altos niveles de dicha vibración puede ser causa de trastornos vasculares en las manos, que se identifica por palidez intermitente de los dedos y se conoce comúnmente como **dedo blanco inducido por vibraciones (DBV)**.

Estudios realizados en Austria, Francia, Gran Bretaña, Holanda, Suecia y Estados Unidos han demostrado que entre el 1,7% y el 3,6% de los trabajadores están expuestos a vibraciones mano-brazo potencialmente peligrosas.

Otro tipo de vibración denominada **vibración de cuerpo completo** ocurre cuando una gran parte del peso del cuerpo humano descansa en una superficie vibrante.

En la mayoría de los casos, la exposición a vibración de cuerpo completo se produce en posición sentado, transmitiéndose la vibración a través del asiento y, en algunas ocasiones, también a través del respaldo. En posición de pie, la vibración se transmite a través de los pies.

La exposición a vibración de cuerpo completo está ampliamente extendida en el mundo laboral y puede ser origen de daños a la salud. La principal afección suele ser daños en la zona lumbar de la columna vertebral y en el sistema nervioso conectado a ella.

Los grupos de trabajadores expuestos más característicos son: conductores de vehículos todo terreno (por ejemplo maquinaria de obras públicas, tractores, etc.),

conductores de carretillas elevadoras, conductores de camiones y autobuses, pilotos de helicópteros, tripulaciones de barcos.

Según las estimaciones realizadas en Estados Unidos, Canadá y Holanda, entre un 4% y un 7% de todos los trabajadores están expuestos a vibraciones de cuerpo completo.

La Unión Europea, consciente de las consecuencias que pueden derivarse de una prolongada exposición de los trabajadores a altos niveles de vibración, ha emprendido dos tipos de actuaciones.

La primera es tratar de **regular la exposición** de los trabajadores a la vibración mediante una Directiva, en el marco del Artículo 118 A del Tratado de la Unión.

Para ello, la Comisión ha elaborado una propuesta modificada de Directiva del Consejo sobre las disposiciones mínimas de Seguridad y Salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos. En ella se incluyen, tanto la exposición a vibraciones mano-brazo, como a vibraciones de cuerpo completo. La propuesta ha sido publicada en el D.O.C.E. N° 230/3 de 19.8.94. Esta Directiva será una directiva específica con arreglo al Artículo 16 de la Directiva Marco 89/391/CEE.

La segunda actuación, mediante la Directiva Máquinas 89/392/CEE, traspuesta al ordenamiento jurídico español mediante el R.D. 1435/1992 de 27 de noviembre, trata de **disminuir la emisión de vibraciones de las máquinas**.

Para ello, la Directiva reconoce que la reducción de las vibraciones forma parte integral de la seguridad de las máquinas y obliga al fabricante a diseñar y construir sus máquinas de modo que los riesgos derivados de la exposición a vibraciones sean los menores posibles, considerando el progreso técnico y la disponibilidad de medios de reducción de las vibraciones, en particular en la fuente.

También obliga al fabricante a dar información cuantitativa (declaración de vibraciones) sobre el nivel de vibraciones emitidas por la máquina, bajo unas determinadas condiciones de ensayo.

El objetivo de la declaración de vibraciones es permitir, a los potenciales compradores de máquinas, la comparación entre las emisiones de vibraciones de las máqui-

nas existentes en el mercado. Una forma barata y eficiente de reducir la exposición a vibraciones es, simplemente, comprar la máquina con menor nivel de emisión de vibraciones.

1.1 OBJETIVO

Aparte de las exigencias derivadas de la futura Directiva de Agentes Físicos, la Ley 31/1995 de 8 de noviembre de Prevención de Riesgos Laborales obliga de forma genérica, en su Artículo 16, a una evaluación de riesgos en la empresa.

En ese sentido, el libro contiene información suficiente para poder llevar a cabo una evaluación de los riesgos derivados de la exposición a vibraciones en el lugar de trabajo.

Tanto para vibración mano-brazo como para vibración de cuerpo completo, solamente se exponen unas nociones generales sobre los métodos de control de los riesgos derivados de la exposición a esos tipos de vibraciones, ya que un tratamiento más exhaustivo del tema requiere un texto monográfico.

No se contemplan aspectos relacionados con la evaluación de la salud de los trabajadores expuestos a vibraciones, aunque, como se dice en los capítulos 4 y 5, la evaluación de la salud es una parte esencial de cualquier programa de lucha contra los riesgos derivados de la exposición a vibraciones, además de ser una obligación legal exigida en el artículo 22 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales.

El libro también contiene información para ayudar a los fabricantes de máquinas a cumplir con las exigencias legales impuestas por el Reglamento de máquinas R.D. 1435/1992, en el sentido de exponer el marco normativo de apoyo para dicho cumplimiento.

1.2 CONTENIDO

El libro se compone de seis capítulos:

En el presente capítulo se señala el objetivo del libro y se da una visión general del

En el capítulo 2 se tratan los conceptos básicos de vibraciones. Con objeto de explicar el importante concepto de resonancia, se describen los sistemas amortiguados y no amortiguados en vibración libre y forzada. Se exponen los conceptos de transmisibilidad y aislamiento que se utilizan ampliamente en el control de vibraciones, así como la transmisión de la vibración a través del cuerpo humano, en especial la transmisibilidad del cuerpo humano en la dirección z. El capítulo finaliza describiendo los parámetros básicos para medida y cuantificación de los niveles de vibración.

El capítulo 3 está dedicado a la medida genérica de las vibraciones. En él se exponen la composición, el funcionamiento y las normas que han de cumplir los elementos componentes de los vibrómetros, dedicando especial atención a los acelerómetros, que es el elemento esencial de un equipo de medida de vibraciones.

El capítulo 4 trata la vibración mano-brazo. Después de una introducción al tema, se relacionan los efectos derivados de la exposición a ese tipo de vibración. Se explican los métodos de medida y evaluación siguiendo la norma europea UNE ENV 25349:1996, así como las acciones preventivas de carácter general que son precisas para eliminar o reducir el riesgo derivado de la exposición a vibración mano brazo. El capítulo finaliza explicando las exigencias legales, en cuanto a exposición a vibración mano-brazo, en la futura Directiva de Agentes Físicos.

El capítulo 5 trata de la vibración de cuerpo completo, analizando en primer lugar los efectos derivados de una exposición prolongada a este tipo de vibración. En la primera parte del capítulo se indican los métodos de medida y evaluación de la vibración de cuerpo completo según el proyecto de norma ISO DIS 2631-1.2. En la segunda parte se expone un plan para la prevención y protección de los trabajadores frente a los riesgos derivados de la exposición a vibración de cuerpo completo. La tercera y última parte del capítulo explica las exigencias legales, en cuanto a exposición a vibración de cuerpo completo, en la futura Directiva de Agentes Físicos.

El capítulo 6 y último describe la normativa sobre vibraciones. En él se exponen las disposiciones, tanto sobre exposición a vibraciones, como sobre emisión de vibraciones. También se relacionan los organismos internacionales, europeos y nacionales encargados de la elaboración de normas sobre vibraciones. Una parte del capítulo se dedica a la forma de utilizar las normas a la hora de fabricar una máquina o equipo que genere vibraciones. El capítulo finaliza relacionando las normas sobre vibraciones, actualmente vigentes y en período de elaboración.

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS BÁSICOS DE VIBRACIONES

2.0 INTRODUCCIÓN

Puede definirse la vibración como el movimiento oscilante de un sistema mecánico elástico, respecto a una posición de referencia inicial.

Si un sistema mecánico se desplaza de su posición de equilibrio mediante una acción externa, tal como un impacto, se le comunica una energía que es el origen de un movimiento vibratorio del sistema. El sistema vibrará con una frecuencia denominada **frecuencia natural de vibración**. Este tipo de movimiento se conoce como **vibración libre** y se anulará con el paso del tiempo debido a la pérdida de energía en los elementos pasivos del sistema.

Cuando se somete un sistema mecánico a una fuerza excitadora externa que le obligue a vibrar, se producen las **vibraciones forzadas del sistema**. En este tipo de vibración, cuando coincide la frecuencia de excitación con la frecuencia natural del sistema, se produce un efecto llamado **resonancia**, que estudiaremos en detalle más adelante.

Para definir el movimiento de un sistema mecánico hay que determinar un número de coordenadas independientes, que se denominan grados de libertad. El sistema mecánico masa-muelle de la figura 2.2 tiene un solo grado de libertad ya que, obligado por una serie de dispositivos mecánicos que no se indican en la figura, sólo puede moverse a lo largo del eje vertical.

Los sistemas mecánicos reales son sistemas continuos y tienen infinitos grados de libertad. Para su estudio se simplifican mediante modelos que reducen los grados de libertad a un número finito (sistemas discretos). Un sistema con n grados de libertad es capaz de vibrar con n frecuencias naturales.

Para el análisis matemático de las vibraciones se reducen los sistemas mecánicos a sistemas ideales compuestos por masas, muelles y amortiguadores viscosos. El modelo que emplearemos en nuestro estudio es el caso más sencillo: Sistema lineal con un grado de libertad en vibración libre y forzada.

2.1 ECUACIÓN DE UN MUELLE

Para desplazar un muelle una distancia x de su posición de equilibrio, se necesita una fuerza F dada por (Fig. 2.1):

$$F = K \cdot x \quad (2.1)$$

Siendo:

F = Fuerza aplicada (N)

k = Constante elástica del muelle (N/m)

x = Desplazamiento (m)

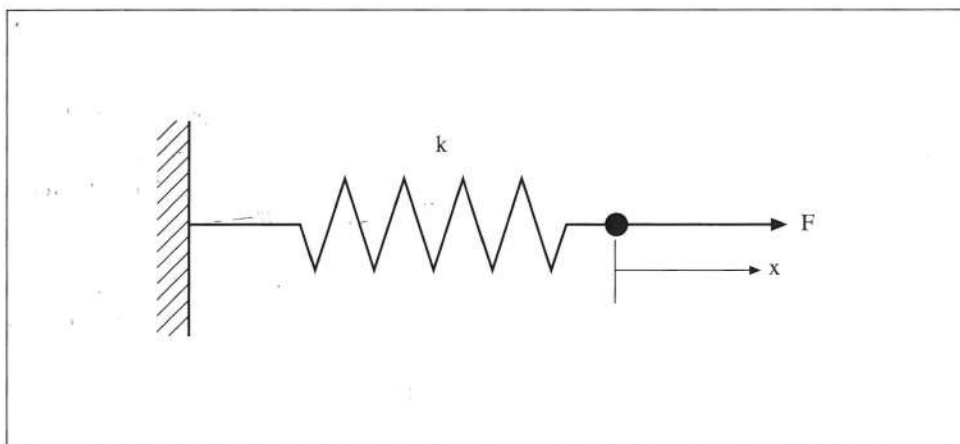


Fig. 2.1

2.2 SISTEMA NO AMORTIGUADO CON UN GRADO DE LIBERTAD. VIBRACIÓN LIBRE

Consideremos el sistema no amortiguado con un grado de libertad en vibración libre (Fig. 2.2). Este sistema ideal se compone de un muelle (supuesto sin masa), de constante elástica k , que soporta una masa M . La masa está obligada a moverse únicamente en la dirección x . Se desprecia la pérdida de energía del sistema.

Supongamos que desplazamos la masa una distancia x de su posición de equilibrio. El muelle ejercerá una fuerza igual a $-k x$. Si soltamos la masa, vibrará oscilando por encima y por debajo de su posición de equilibrio.

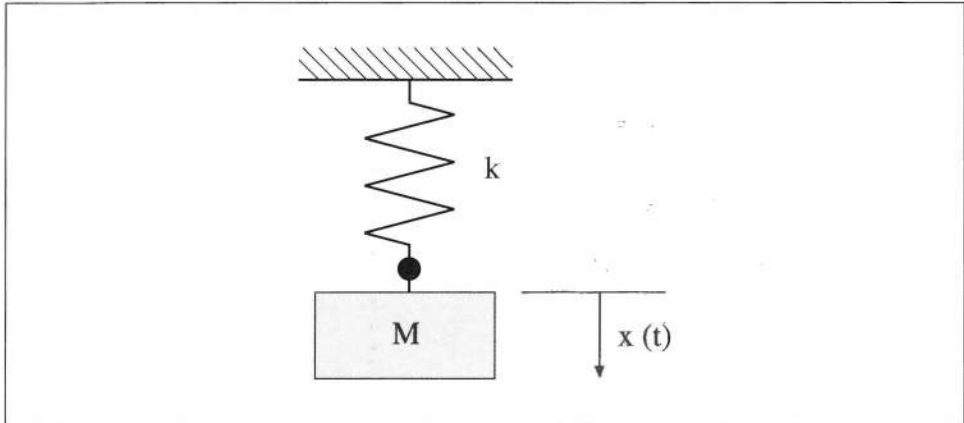


Fig. 2.2

La ecuación de equilibrio es:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + k x = 0 \quad (2.2)$$

Siendo:

M = Masa en kg

x = Desplazamiento en m

k = Constante elástica del muelle en N/m

t = Tiempo en segundos

La solución general de esta ecuación diferencial es de la forma:

$$x = C_1 \cos \omega_n t + C_2 \operatorname{sen} \omega_n t \quad (2.3)$$

Siendo:

C_1 y C_2 = Constantes arbitrarias que dependen de las condiciones iniciales.

ω_n = Pulsación natural en rad/s.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (2.4)$$

Supongamos que las condiciones iniciales para $t = 0$ sean:

$x(0) = X_0$ Desplazamiento inicial

$dx/dt(0) = V_0$ Velocidad inicial

Entonces:

$$C_1 = X_0$$

$$C_2 = V_0 / \omega_n$$

y la ecuación (2.3) quedará:

$$x = X_0 \cos \omega_n t + \frac{V_0}{\omega_n} \sin \omega_n t \quad (2.5)$$

Imaginemos una plumilla asociada a la masa que vibra y que se apoya sobre una tira de papel que se mueve hacia la izquierda con velocidad constante (Fig. 2.3).

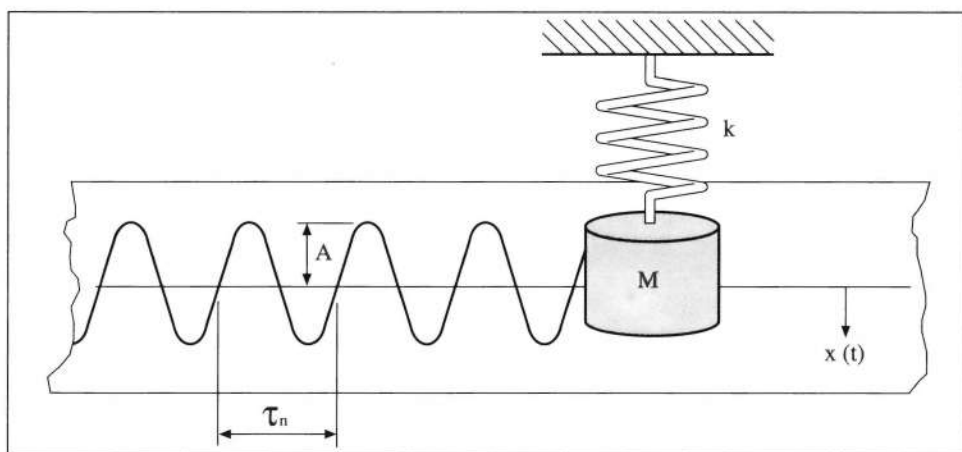


Fig. 2.3

La ecuación (2.5) indica que la pluma dibujará una senoide de amplitud:

$$A = \sqrt{X_0^2 + \left(\frac{V_0}{\omega_n}\right)^2} \quad (2.6)$$

También puede verse que los valores del desplazamiento x , se repiten cuando $\omega_n t = 2\pi, 4\pi$, etc.

Por lo tanto, el **período natural de vibración τ_n en segundos es:**

$$\tau_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}} \quad (2.7)$$

La **frecuencia natural de vibración en Hz**, será la inversa del período natural:

$$f_n = \frac{1}{\tau_n} = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (2.8)$$

Volviendo a la ecuación (2.5), se ve que en este caso la vibración consta de dos partes: una vibración proporcional a $\cos \omega_n t$ y que depende del desplazamiento inicial de la masa, y otra que es proporcional a $\sin \omega_n t$ y que depende de la velocidad inicial V_0 .

Cada una de estas partes puede ser representada gráficamente como se muestra en las Fig. 2.4.a y 2.4.b con el tiempo como abscisa y el desplazamiento como ordenada.

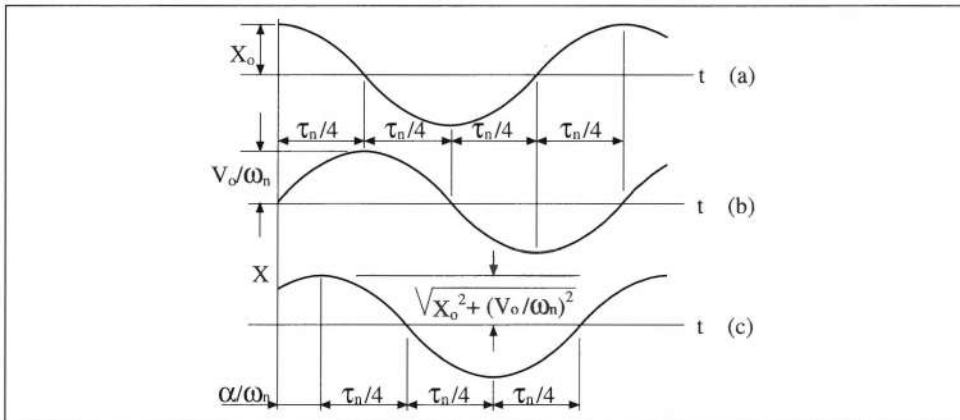


Fig. 2.4

La expresión 2.5 podemos ponerla de la forma siguiente:

$$x = |A| \cos(\omega_n t - \alpha) \quad (2.9)$$

Siendo:

$$|A| = \sqrt{X_0^2 + \left(\frac{V_0}{\omega_n}\right)^2} \quad (2.10)$$

y α la diferencia de fase entre las dos vibraciones.

$$\alpha = \arctg \frac{V_0}{\omega_n X_0} \quad (2.11)$$

Se ve que la suma de dos movimientos armónicos simples, uno proporcional a $\cos \omega_n t$ y otro a $\sin \omega_n t$, es también un movimiento armónico simple proporcional a $\cos(\omega_n t - \alpha)$ tal como está representado en la Fig. 2.4.c. La ordenada máxima de esta curva representa el desplazamiento máximo del cuerpo vibrante a partir de su posición de equilibrio y se le da el nombre de amplitud de la vibración.

En resumen: **Un sistema mecánico no amortiguado con un grado de libertad en vibración libre, compuesto por una masa M y un muelle de constante elástica k , vibrará oscilando alrededor de su posición de equilibrio (Fig. 2.3). Su movimiento puede expresarse por una función cosenoidal cuya amplitud A dependerá de las condiciones iniciales de la excitación. La frecuencia de la vibración, que se denomina frecuencia natural de vibración, sólo depende de M y k , según la expresión 2.8. Al no existir elementos disipativos de energía en el sistema mecánico, este vibrará siempre igual a lo largo del tiempo.**

2.3 ECUACIÓN DE UN AMORTIGUADOR VISCOSO

Para desplazar un amortiguador viscoso (Fig. 2.5) con una velocidad dx/dt , se requiere una fuerza F de valor:

$$F = C \frac{dx}{dt} \quad (2.12)$$

Siendo:

C = Coeficiente de amortiguamiento viscoso (N.s/m)

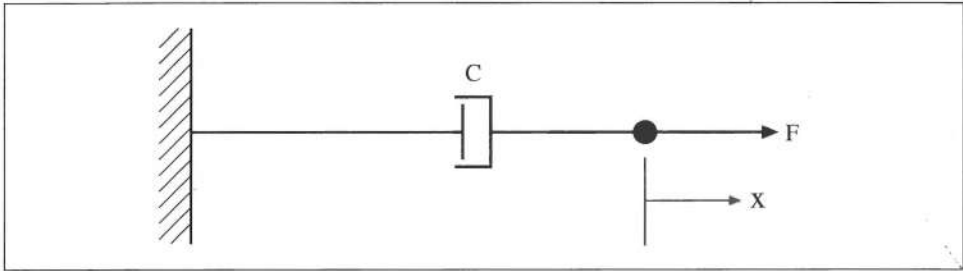


Fig. 2.5

Bajo el punto de vista energético, un amortiguador es un dispositivo que transforma la energía cinética y potencial en calor y de este modo extrae energía cuando está montado en un sistema vibratorio.

2.4 SISTEMA AMORTIGUADO CON UN GRADO DE LIBERTAD. VIBRACIÓN LIBRE

Consideremos el sistema amortiguado con un grado de libertad en vibración libre de la Fig. 2.6.

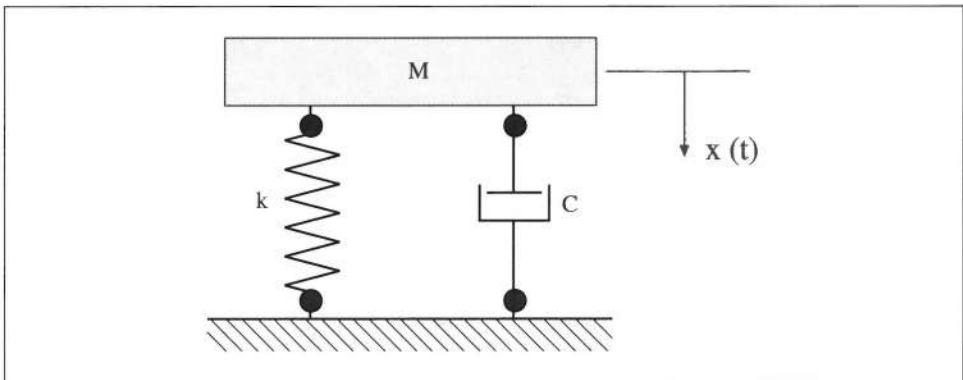


Fig. 2.6

El sistema se compone de un muelle de constante elástica k y un amortiguador de coeficiente de amortiguamiento viscoso C . Ambos dispositivos soportan una masa M que está obligada a moverse únicamente en la dirección x .

Si desplazamos la masa M una distancia x de su posición de equilibrio, el muelle ejercerá una fuerza igual a $-k x$ y el amortiguador una fuerza igual a $-C dx/dt$. Si soltamos la masa, vibrará oscilando por encima y por debajo de su posición de equilibrio.

La ecuación de equilibrio es:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + k x = 0 \quad (2.13)$$

Dividiendo por M :

$$\ddot{x} + \frac{C}{M} \dot{x} + \frac{k}{M} x = 0 \quad (2.14)$$

Utilizando las notaciones:

$$\frac{C}{2M} = n \quad (2.15)$$

$$\sqrt{\frac{k}{M}} = \omega_n \quad (2.16)$$

Tenemos:

$$\ddot{x} + 2n \dot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad (2.17)$$

Ecuación diferencial lineal de coeficientes constantes, cuya ecuación característica es:

$$r^2 + 2n r + \omega_n^2 = 0 \quad (2.18)$$

Las raíces de esta ecuación son:

$$r = -n \pm \sqrt{n^2 - \omega_n^2} \quad (2.19)$$

Dependiendo de los valores de n y ω_n , pueden darse los siguientes casos:

2.4.1 SISTEMAS SUBAMORTIGUADOS

Cuando la cantidad n^2 (que depende del amortiguamiento del sistema) es menor que ω_n^2 , entonces las dos raíces de la ecuación característica son complejas conjugadas.

Haciendo $\omega_d^2 = \omega_n^2 - n^2$ (2.20), las dos raíces de (2.19) son:

$$r = -n \pm \omega_d j \quad (2.21)$$

y la solución de la ecuación (2.17) es:

$$x = e^{-nt} (C_1 \cos \omega_d t + C_2 \sen \omega_d t) \quad (2.22)$$

Puede comprobarse que la expresión entre paréntesis de la fórmula 2.22 tiene idéntica forma que la expresión 2.5 aunque difiere en el PERÍODO NATURAL DE VIBRACIÓN, que ahora es:

$$\tau_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \frac{n^2}{\omega_n^2}}} \quad (2.23)$$

Si comparamos 2.23 y 2.7, es decir, los períodos naturales de vibración de los sistemas amortiguado y no amortiguado, vemos que $\tau_d > \tau_n$. Cuando n es pequeña comparada con ω_n , este aumento es una pequeña cantidad de segundo orden.

En la práctica puede suponerse que un pequeño amortiguamiento viscoso no afecta al período natural de vibración, es decir, $\tau_d \simeq \tau_n$

¿Qué sucede con la amplitud de la vibración?

El factor e^{-nt} , es decir, $e^{-ct/2M}$, decrece gradualmente con el tiempo por lo que **resultarán amortiguadas las vibraciones** generadas originalmente.

Para hallar el valor de las constantes C_1 y C_2 , suponemos que en $t = 0$:

$$x(0) = X_0 \quad (2.24)$$

$$(dx/dt)_{t=0} = V_0 \quad (2.25)$$

Con lo que:

$$C_1 = X_0 \quad (2.26)$$

$$C_2 = \frac{V_0 + nX_0}{\omega_d} = \frac{V_0}{\omega_d} + \frac{CX_0}{2M\omega_d} \quad (2.27)$$

y la solución final de 2.22 es:

$$x = e^{-\frac{c}{2M}t} \left(X_0 \cos \omega_d t + \left(\frac{V_0}{\omega_d} + \frac{CX_0}{2M\omega_d} \right) \sin \omega_d t \right) \quad (2.28)$$

El primer término de esta ecuación es proporcional al desplazamiento inicial y el segundo, al desplazamiento y velocidad inicial. Ambos términos pueden ser representados gráficamente (Fig. 2.7).

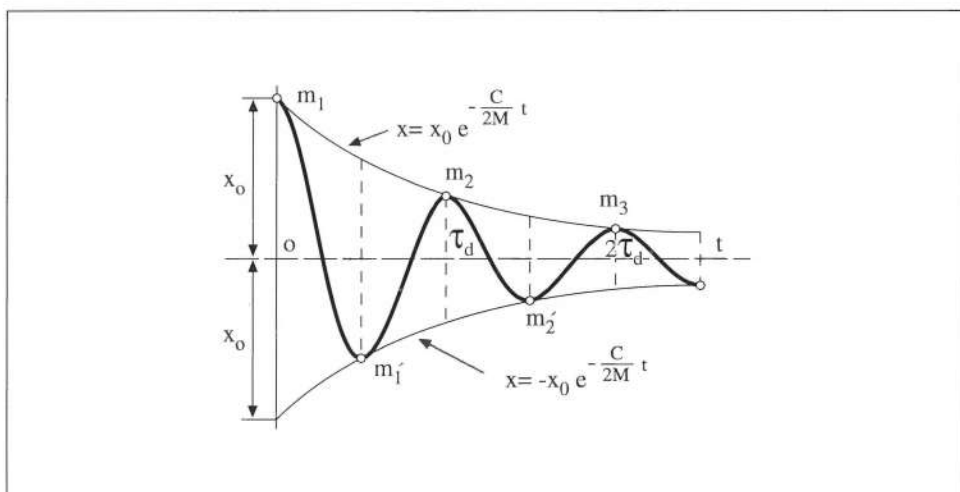


Fig. 2.7

El primer término es el representado por la curva ondulada de la figura 2.7 que es tangente a la curva $x = X_0 e^{-ct/2M}$ en los puntos m_1, m_2 , etc., y a la curva $x = -X_0 e^{-ct/2M}$ en los puntos m'_1, m'_2 , etc.

En la ecuación 2.28, se ve que la amplitud de la vibración **disminuye** después de cada ciclo. **La velocidad de amortiguamiento depende de la magnitud $C/2M$.**

2.4.2 SISTEMAS SOBREAMORTIGUADOS Y CRÍTICAMENTE AMORTIGUADOS. AMORTIGUAMIENTO CRÍTICO

Si $n^2 > \omega_n^2$ ($C^2/(2M)^2 > k/M$) las raíces de la ecuación característica son reales y negativas:

$$r_1 = -n + \sqrt{n^2 - \omega_n^2} \quad r_2 = -n - \sqrt{n^2 - \omega_n^2} \quad (2.29)$$

La solución de la ecuación 2.14 es de la forma:

$$x = C_1 \cdot e^{r_1 t} + C_2 \cdot e^{r_2 t} \quad (2.30)$$

La solución no contiene ningún factor periódico y no representa un movimiento vibratorio. La resistencia viscosa es tan grande que el cuerpo, desplazado de su posición de equilibrio, **no vibra y solamente repta gradualmente desde el reposo a esa posición de equilibrio**. A estos sistemas se les denomina **Sistemas sobreamortiguados** (Fig. 2.8).

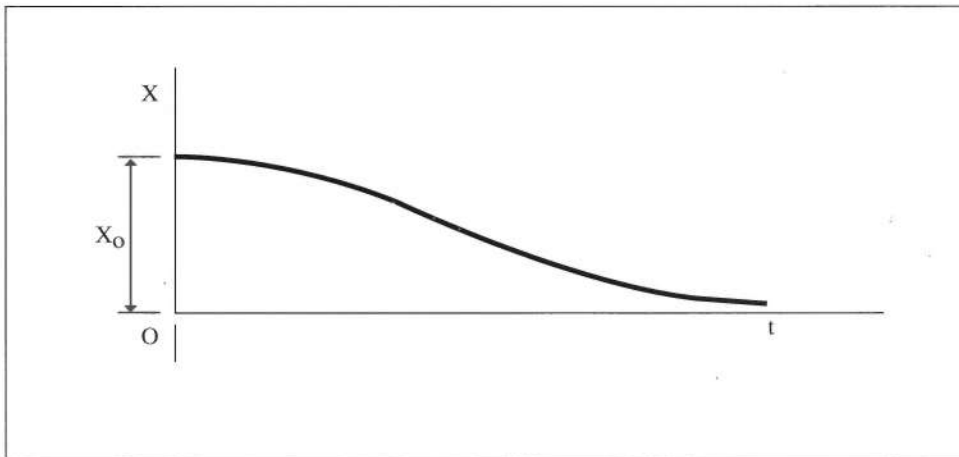


Fig. 2.8

En la ecuación 2.19, cuando $n^2 = \omega_n^2$, es decir, cuando $C^2/(2M)^2 = k/M$, la ecuación característica tiene dos soluciones idénticas, reales y negativas.

Al valor de amortiguamiento viscoso que cumple la ecuación anterior se le llama **C_c : Coeficiente de amortiguamiento crítico**.

$$\frac{C^2}{(2M)^2} = \frac{k}{M}$$
$$C_c = 2\sqrt{k M} \quad (2.31)$$

La solución de la ecuación 2.14 para el caso de amortiguamiento crítico, considerando idénticas condiciones de contorno, es:

$$x = e^{-\frac{C_c}{2M}t} \left(X_0 + \left(V_0 + C_c \frac{X_0}{2M} \right) t \right) \quad (2.32)$$

De igual modo que sucedía en el caso anterior (sistemas sobreamortiguados), en el amortiguamiento crítico no existen términos periódicos y el **movimiento no es vibratorio**.

La masa de un sistema críticamente amortiguado, después de alcanzar su mayor valor de desplazamiento, **vuelve a su posición de equilibrio, sin sufrir oscilación**.

2.4.3 FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO. CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS AMORTIGUADOS CON UN GRADO DE LIBERTAD EN VIBRACIÓN LIBRE

Se define **Factor de amortiguamiento** r_d , al cociente entre el coeficiente de amortiguamiento viscoso del sistema y el coeficiente de amortiguamiento crítico.

$$r_d = \frac{C}{C_c} \quad (2.33)$$

Si $r_d < 1$, el sistema se denomina **Subamortiguado** y sus características han sido descritas en el apartado 2.4.1.

Cuando $r_d = 1$, el sistema se denomina **Críticamente amortiguado**.

Si $r_d > 1$, el sistema se denomina **Sobreamortiguado**.

Estos dos últimos sistemas, cuyo comportamiento ha sido descrito en el apartado 2.4.2, tienen poco interés bajo el punto de vista de control de ruido y vibraciones.

2.5 SISTEMA AMORTIGUADO CON UN GRADO DE LIBERTAD. VIBRACIÓN FORZADA

Al sistema descrito en el apartado 2.4 le añadimos ahora una fuerza excitadora $F(t)$, según se indica en la Fig. 2.9

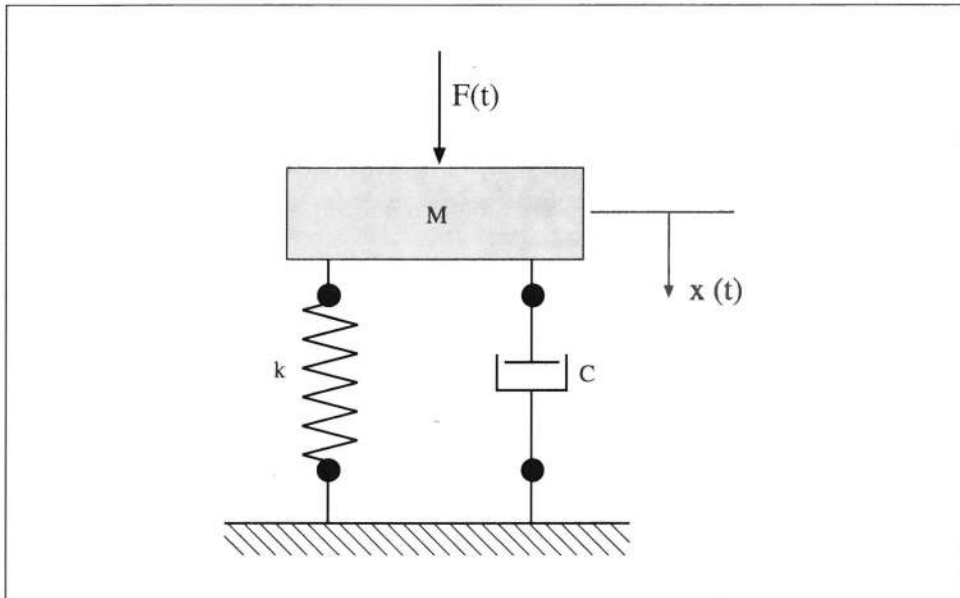


Fig. 2.9

En muchos casos la fuerza $F(t)$ puede representarse por una o más funciones senoidales (por ejemplo, la fuerza producida en una máquina por disequilibrios dinámicos).

Supongamos que $F(t)$ sea de la forma:

$$F(t) = A e^{j\omega t} = A (\cos \omega t + j \sin \omega t)$$

La ecuación de equilibrio del sistema indicado en la Figura 2.9 es:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + k x = A e^{j\omega t} \quad (2.34)$$

La solución general de esta ecuación se compone de la suma de la solución general de la ecuación diferencial homogénea y de una solución particular de la completa, es decir, sería de la forma:

$$x = e^{-nt} (C_1 \cos(\omega_d t) + C_2 \sin(\omega_d t)) + B e^{j\omega t} \quad (2.35)$$

El primer miembro es la solución general de la homogénea, ya desarrollada en el apartado 2.4.1.

Sabemos que, debido al amortiguamiento, la amplitud decrece con el tiempo hasta hacerse cero (Fig. 2.7). Esta solución transitoria tiene mucho interés cuando se estudian los esfuerzos a que están sometidas las piezas de las máquinas, pero tiene poco interés en control de ruido y vibraciones.

Por lo tanto, en nuestro caso, ignoraremos la componente transitoria, que como se ha dicho desaparece después de unos cuantos ciclos y consideraremos sólo la solución particular de la completa, es decir, la **Respuesta permanente del sistema**.

$$x = B e^{j\omega t} \quad (2.36)$$

Derivando esta solución:

$$\frac{dx}{dt} = j\omega B e^{j\omega t} \quad (2.37)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 B e^{j\omega t} \quad (2.38)$$

Sustituyendo 2.37 y 2.38 en 2.34 se llega a:

$$(-M\omega^2 + jC\omega + K) B e^{j\omega t} = A e^{j\omega t} \quad (2.39)$$

Dividiendo por $e^{j\omega t}$

$$\frac{B}{A} = \frac{1}{1 - \omega^2 \frac{M}{k} + j\omega \frac{C}{k}} \quad (2.40)$$

Haciendo:

· r_f = razón entre la frecuencia de excitación f y la frecuencia natural de vibración f_n (2.8)

$$r_f = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{f}{f_n} = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{k}{M}}} \quad (2.41)$$

· r_d = factor de amortiguamiento (2.33)

$$r_d = \frac{C}{C_c}$$

$$\frac{B}{\frac{A}{K}} = \frac{1}{1 - r_f^2 + j 2 r_d r_f} \quad (2.42)$$

Al cociente entre el desplazamiento de la masa X y el desplazamiento de la masa debido a la carga estática A (es decir, la respuesta del sistema cuando la pulsación excitadora es cero ($\omega = 0$)), se le denomina:

$$\text{Factor de amplificación} = \frac{X}{\frac{A}{k}} \quad (2.43)$$

Este factor es el módulo de la expresión compleja 2.42

$$\frac{X}{\frac{A}{k}} = \left| \frac{B}{\frac{A}{k}} \right| = \frac{1}{\sqrt{(1 - r_f^2)^2 + (2 r_d r_f)^2}} \quad (2.44)$$

Cuando el factor de amortiguamiento r_d es distinto de cero ($r_d \neq 0$), el desplazamiento de la masa retrasa un ángulo de fase respecto a la fuerza excitadora y su valor es:

$$\varphi = \arctan \frac{2 r_d r_f}{1 - r_f^2} \quad (2.45)$$

El ángulo de fase es interesante para determinar experimentalmente el coeficiente de amortiguamiento viscoso C de un sistema, mediante la medida del desfase entre la fuerza excitadora y la respuesta del sistema.

Volviendo a la expresión 2.44, vemos que el factor de amplificación depende de:

- La razón r_f entre la frecuencia de excitación f y la frecuencia natural de vibración f_n .
- Factor de amortiguamiento r_d .

2.6 RESONANCIA

Hemos visto que los **sistemas libres no amortiguados** vibran a la frecuencia natural de vibración f_n (2.8).

Los **sistemas libres subamortiguados** vibran a la frecuencia natural de vibración amortiguada (2.23)

La respuesta permanente de un sistema amortiguado sometido a una fuerza excitadora de frecuencia f , tiene también frecuencia f .

En la Figura 2.10 se indica el factor de amplificación en función de la razón r_f entre la frecuencia excitadora y la frecuencia natural (ecuación 2.44).

En la ecuación 2.43, si suponemos que $r_d = 0$ (sistema no amortiguado) y $r_f = 1$, es decir, la frecuencia de excitación es igual a la frecuencia natural, el factor de amplificación (y consecuentemente la amplitud del desplazamiento de la masa bajo vibración) tiende a infinito.

A esta situación, es decir, **cuando la frecuencia excitadora coincide con la frecuencia natural del sistema, se dice que el sistema está en RESONANCIA**.

En sistemas con un amortiguamiento muy pequeño, cuando entran en resonancia ($f = f_n$), el desplazamiento de la masa se hace enormemente grande, hasta que, o bien se detiene mediante algún tope, o se rompe la sujección de la masa.

Lo que sucede en la resonancia, bajo el punto de vista energético, es que en cada ciclo, la fuerza excitadora introduce más energía en el sistema, haciendo con ello aumentar el desplazamiento de la masa.

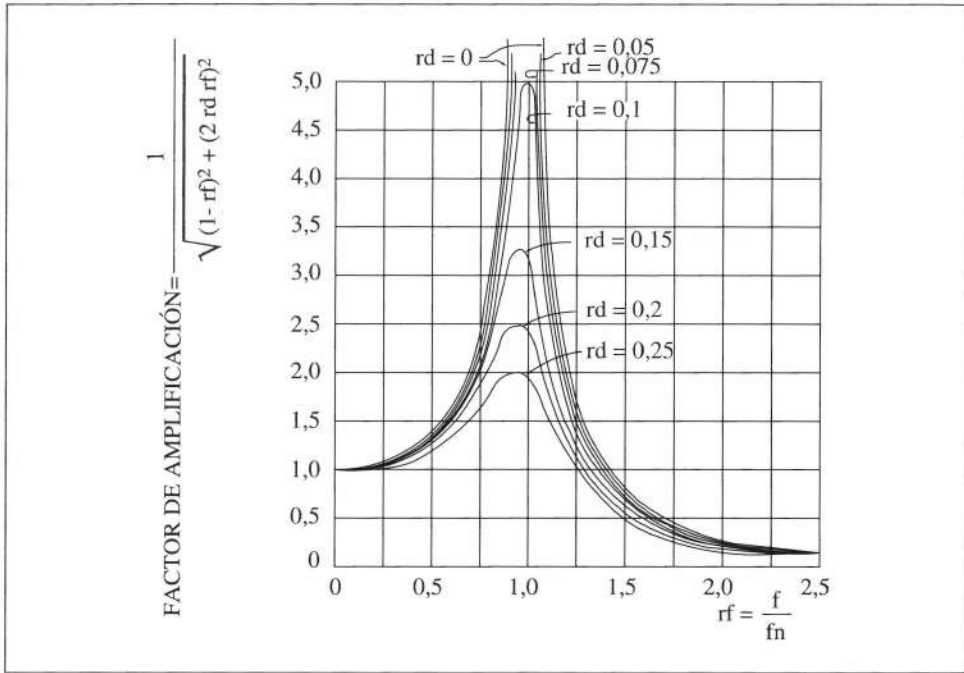


Fig. 2.10

Cuando $r_f = 1$ ($f = f_n$), el factor de amplificación vale:

$$\left[\frac{X}{A} \right]_{r_f=1} = \frac{1}{2 r_d} \quad (2.46)$$

Para sistemas con un factor de amortiguamiento ligero, el valor máximo del factor de amplificación ocurre para valores de r_f ligeramente inferiores a 1.

Con respecto al ángulo de fase ϕ , en la región de resonancia ($f = f_n$) ocurre una aguda variación en el ángulo cuando el amortiguamiento es pequeño, según se indica en la Figura 2.11.

Para sistemas con varios grados de libertad, existe una frecuencia de resonancia para cada grado de libertad. En los sistemas continuos existen, teóricamente, infinitos grados de libertad.

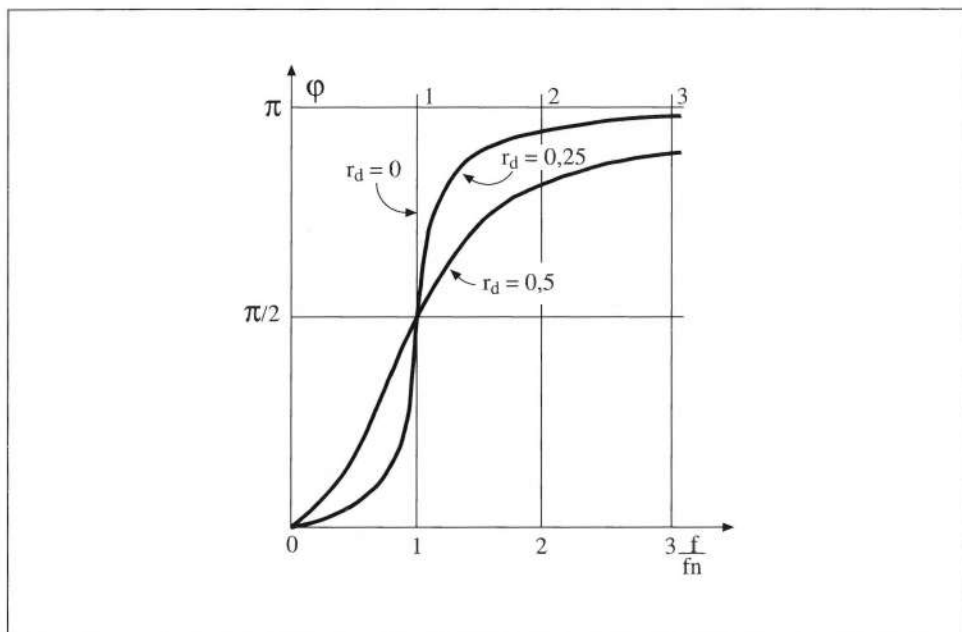


Fig. 2.11

2.7 TRANSMISIBILIDAD

En la Figura 2.12 puede verse que, tanto el muelle como el amortiguador, transmiten fuerzas a la base o soporte.

La fuerza del muelle es kx , opuesta al desplazamiento de la masa y la fuerza del amortiguador es $C dx/dt$, opuesta a la velocidad de la masa.

La relación compleja entre la fuerza transmitida y la fuerza excitadora es:

$$\frac{k + j\omega C}{-M\omega^2 + j\omega C + k} \quad (2.47)$$

Utilizando la nomenclatura utilizada en las expresiones (2.33) y (2.41), la relación entre las amplitudes de las fuerzas transmitida y excitadora es:

$$T = \frac{F_{Tr}}{A} = \sqrt{\frac{1 + (2 r_d r_f)^2}{(1 - r_f^2)^2 + (2 r_d r_f)^2}} \quad (2.48)$$

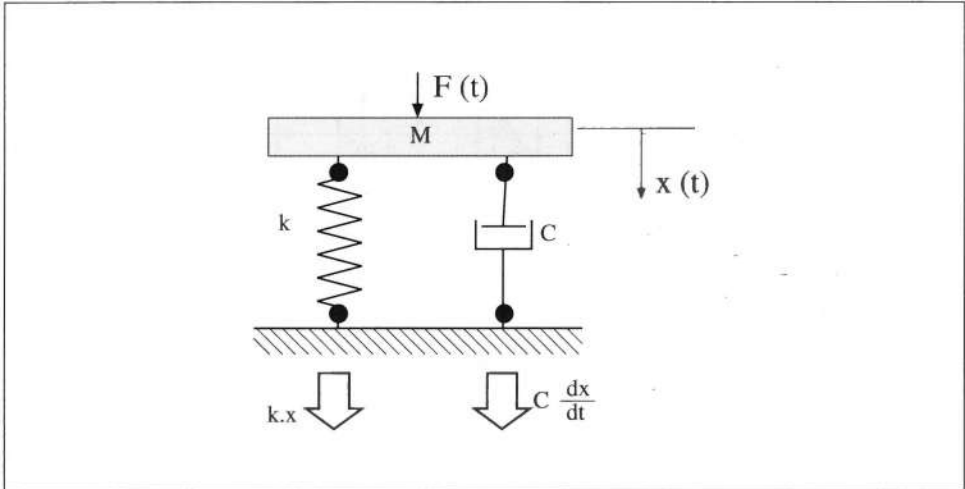


Fig. 2.12

Siendo:

F_{Tr} = Amplitud de la fuerza transmitida (N)

A = Amplitud de la fuerza excitadora (N)

$$T = \frac{F_{Tr}}{A} = \text{Factor de transmisibilidad}$$

La figura 2.13 muestra el factor de transmisibilidad para el sistema de la figura 2.12

Puede verse que, para sistemas poco amortiguados, el máximo factor de transmisibilidad se da, aproximadamente, para $r_f = 1$ (condición de resonancia) y su valor viene dado por la ecuación:

$$T = \frac{F_{Tr}(\max)}{A} \approx \frac{1}{2r_d} \quad (2.49)$$

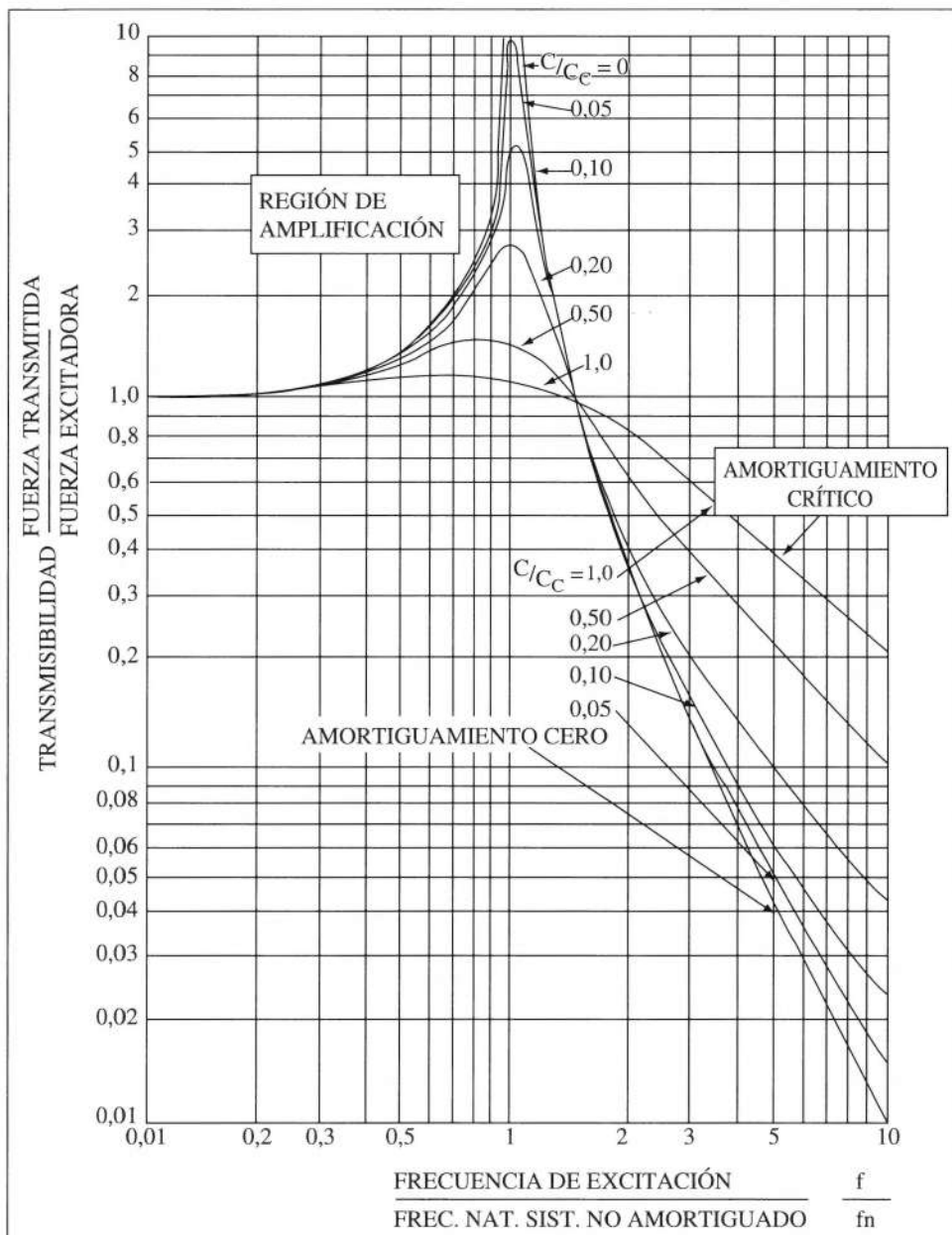


Fig. 2.13

2.8 AISLAMIENTO

Supongamos que tenemos una máquina de masa M sujeta rígidamente a la base G (Fig. 2.14(a)) y que, debido a un desequilibrio dinámico de la máquina, se crea una fuerza periódica excitadora $F(t)$ que se **transmite íntegramente a la base** y, como resultado de esta transmisión, puede haber ruido y vibración en la base.

Para reducir estos nocivos efectos, se puede montar la máquina sobre unos muelles y amortiguadores (Fig. 2.14(b)).

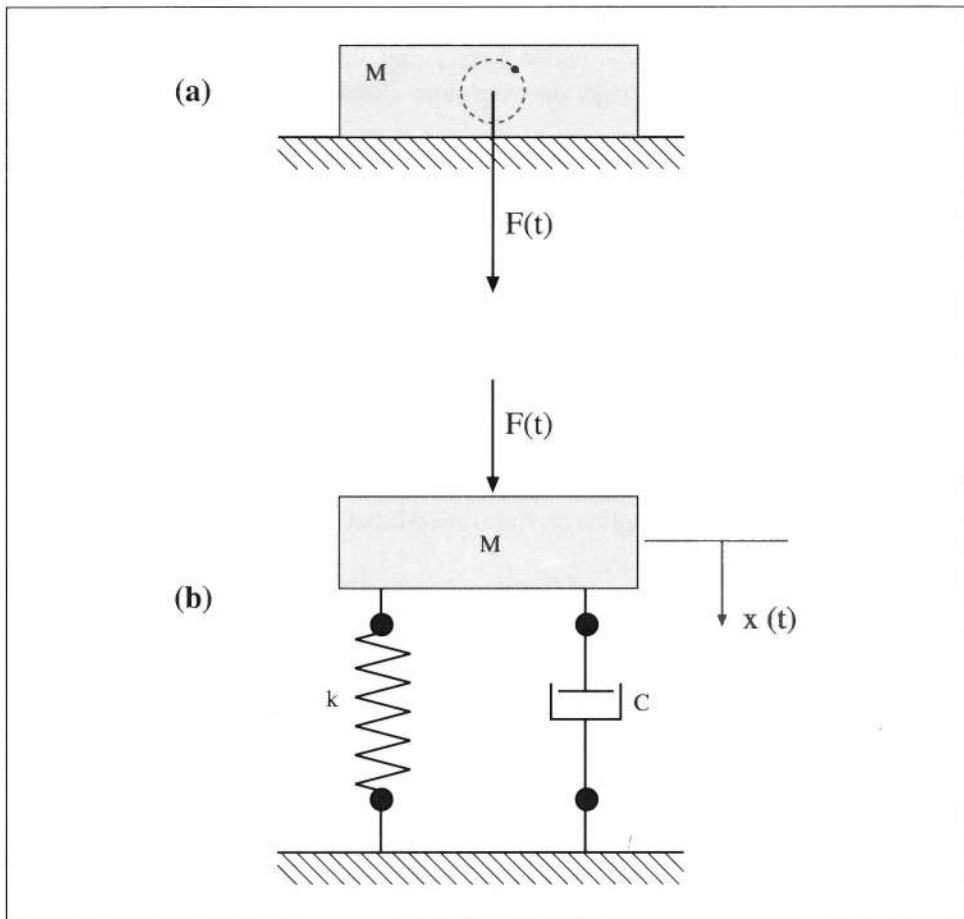


Fig. 2.14

Se entiende como **aislamiento** la situación de los parámetros k , M y C de la Figura 2.14(b), para los cuales **el factor de transmisibilidad es menor que la unidad**.

En la ecuación 2.49, si $T = F_{Tr}/A < 1$, entonces:

$$r_f > \sqrt{2} \quad (2.50)$$

Para todos los valores de r_d : Para los valores de $r_f > 1$, el aislamiento mejora conforme aumenta r_f .

Si la fuerza excitadora es debida a un desequilibrio dinámico de la máquina que gira a velocidad constante, entonces puede conseguirse un buen aislamiento diseñando los aisladores para que se consiga un valor muy alto de r_f .

Para el cálculo del aislamiento sólo se dispone de 2 variables sobre las que trabajar:

- La constante elástica k del muelle.
- El coeficiente de amortiguamiento viscoso.

Con respecto a este último, puede verse en la Figura 2.13 que el amortiguamiento reduce el factor de transmisibilidad en la región $0 < r_f < \sqrt{2}$ en la que se produce una amplificación de la fuerza excitadora.

En la región de **aislamiento** ($\sqrt{2} > r_f$) el amortiguamiento ejerce una acción desfavorable, ya que aumenta el factor de transmisibilidad.

Para valores altos de r_f ($r_f \gg \sqrt{2}$) el factor de transmisibilidad es aproximadamente proporcional al factor de amortiguamiento r_d e inversamente proporcional a la razón de frecuencias r_f .

$$\frac{F_{Tr}}{A} \approx \frac{2 r_d}{r_f} \quad \left(\text{para } r_f \gg \sqrt{2} \right) \quad (2.51)$$

Con el fin de obtener la mayor respuesta en ambas regiones, el sistema de aislamiento puede diseñarse con amortiguadores que ofrecen un amortiguamiento grande, cuando la amplitud de la vibración es grande, mientras que tienen un amortiguamiento pequeño cuando la amplitud de la vibración es pequeña.

2.9 MODELO MECÁNICO DEL CUERPO HUMANO

El cuerpo humano es un sistema extraordinariamente complejo. Para su estudio, en cuanto a su comportamiento frente a las vibraciones, se diseñan modelos mecánicos relativamente simples.

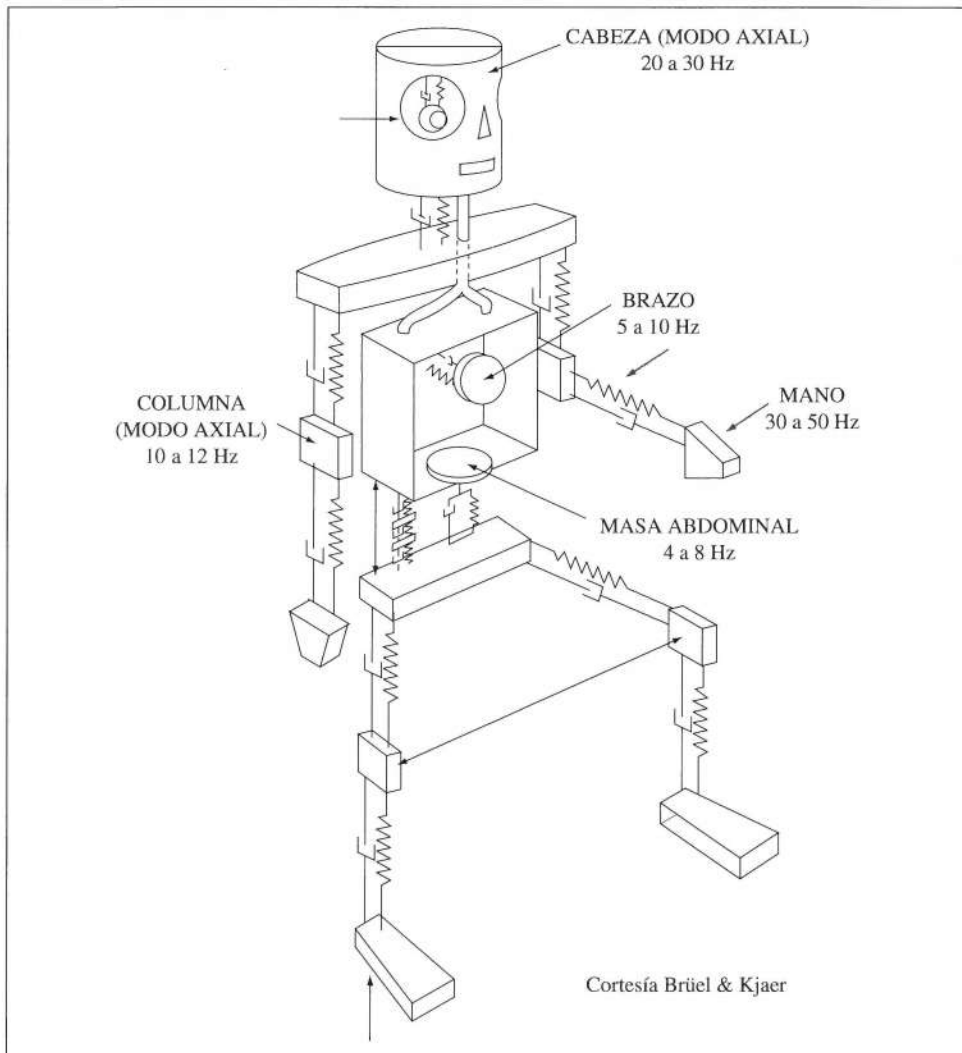


Fig. 2.15

En la Figura 2.15 se indica uno de tales modelos. Cada parte del cuerpo se representa por una masa, un muelle y un amortiguador viscoso.

El cuerpo humano es un sistema altamente amortiguado y como consecuencia de ello, cuando una parte se excita con una frecuencia igual a su frecuencia natural de vibración, la resonancia se presenta en una banda de frecuencias, en vez de en una única.

En la Figura 2.15, las cifras en Hz indican la banda de frecuencias en las que se produce resonancia.

Por ejemplo: la columna es resonante en modo axial para frecuencias de 10 a 12 Hz; la masa abdominal, en la banda de 4 a 8 Hz; y la cabeza en modo axial, en la banda de 20 a 30 Hz.

El cuerpo humano no es simétrico por lo que su respuesta a las vibraciones también depende de la dirección en la cual se aplica la vibración.

2.10 TRANSMISIÓN DE LA VIBRACIÓN A TRAVÉS DEL CUERPO

Cuando deseamos evaluar los efectos que producen diferentes vibraciones en el cuerpo, debemos conocer qué sucede en la TRANSMISIÓN de la vibración desde el punto de entrada hasta la parte del cuerpo que estamos estudiando.

La Figura 2.16 resume una investigación sobre la transmisión vertical de la vibración que le entra por el asiento a una persona sentada. En ordenadas se indica el cociente entre la respuesta de aceleración medida en cabeza, hombros y tórax y la aceleración excitadora aplicada en el asiento.

Puede verse que el cuerpo de la persona **amplifica la vibración** a frecuencias de 1 a 17 Hz y la atenúa a frecuencias superiores a 10-15 Hz.

La norma internacional ISO 7962:1987 “**Transmisibilidad del cuerpo humano en la dirección z**” trata sobre este asunto, destacándose de su contenido lo siguiente:

Cuando se han de conocer los efectos sobre el cuerpo humano ante los choques y vibraciones, es preciso saber las propiedades dinámicas del cuerpo humano. Una

posible técnica de medida para valorar tales propiedades es la transmisibilidad mecánica. La norma reúne toda la información disponible sobre la transmisibilidad a través del cuerpo humano cuando se le somete a vibración en el eje z.

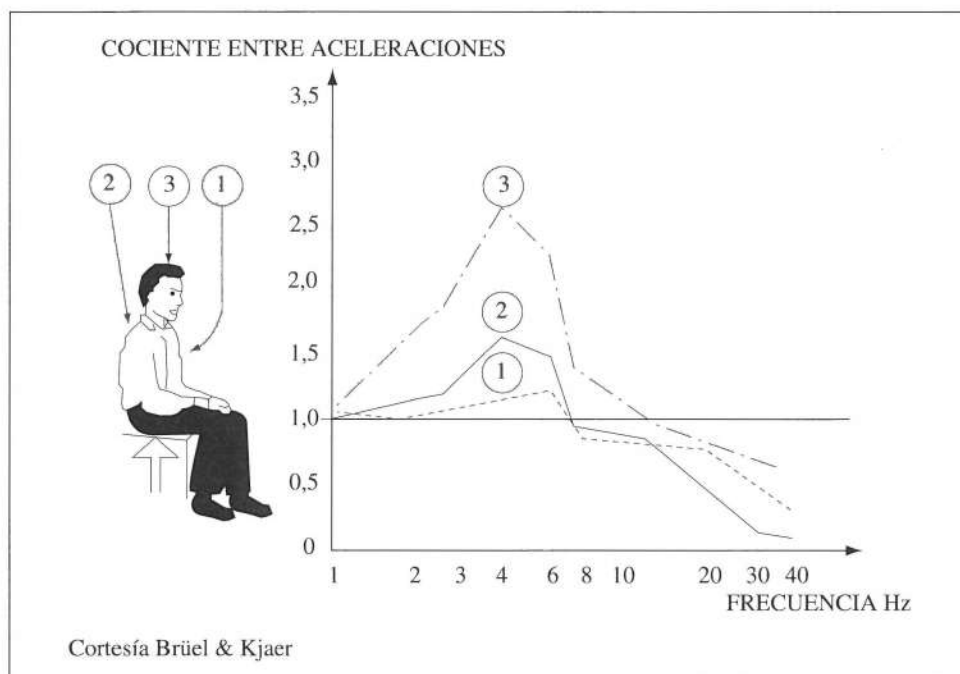


Fig. 2.16

En la norma se define:

Transmisibilidad mecánica.- Relación compleja adimensional de la respuesta de un sistema en estado estacionario sometido a vibración, a la amplitud de la vibración excitadora. La relación puede ser entre fuerzas, desplazamientos, velocidades o aceleraciones. Cuando la vibración no es senoidal, la transmisibilidad puede determinarse por el espectro de frecuencias.

Transmisibilidad humana.- Relación, normalmente expresada por el módulo de transmisibilidad T , que describe la transferencia de la vibración al cuerpo entero desde un punto de entrada a otro punto del cuerpo definido por sus coordenadas dentro de un segmento anatómico.

Transmisibilidad en módulo T.- Relación entre los módulos de los movimientos.

Transmisibilidad en fase ϕ .- Diferencia de fase entre los movimientos de entrada y salida.

La transmisibilidad del cuerpo humano es función de:

- a) La orientación del cuerpo, postura y tensión muscular con respecto a la entrada de vibración.
- b) El acoplamiento mecánico entre la entrada de la vibración y el cuerpo humano.
- c) La utilización o no de un sistema de sujeción y, en su caso, las características de tal sistema.

La Norma da valores medios, pero los resultados indicados en la Figura 2.17 pueden diferir sustancialmente.

Rango de frecuencia.- Las curvas de transmisibilidad se dan para un rango de frecuencias de 0,5 a 31,5 Hz.

Linealidad.- El cuerpo humano, sometido a vibración en el eje z, tiene características no lineales. Se puede prescindir de la no linealidad si se utilizan amplitudes de aceleración que no excedan de las que han servido para determinar los valores (de 2 a 4 m/s²).

Postura.- La transmisibilidad depende de la postura del cuerpo y de la tensión muscular, en definitiva, de la actividad que realiza el sujeto. Las posturas básicas son: sentado y de pie.

La transmisibilidad en el eje z y en posición sentado es muy similar para las dos condiciones: excitación del torso sólo y excitación del torso y de los pies.

Punto de medida.- Sólo se utiliza la medida del movimiento vertical de la cabeza.

Restricciones al movimiento del cuerpo.- La sujeción o restricciones mecánicas tales como el diseño de los asientos, respaldos, apoyapiés, apoyabrazos, arneses, etc. afectan a la transmisibilidad de la vibración a través del cuerpo.

Limitación en los datos disponibles.- No pueden conocerse las variaciones que se producirán en la transmisibilidad cuando varía el peso y la estatura de la persona.

Los valores han sido obtenidos con vibraciones senoidales. Dado que pueden existir no linealidades, los resultados obtenidos con vibraciones no senoidales no deberían aplicarse para otras formas de movimiento.

Resultados obtenidos

En la Fig 2.17 se indica el valor de la transmisibilidad en el eje z, cuando el hombre está sentado o de pie en postura derecha.

- Para frecuencias inferiores a 2 Hz, el cuerpo vibra como lo haría una masa sola. $T \approx 1$.
- T crece hasta la región de 5 Hz que es la región con máxima resonancia cuando se excita verticalmente en el eje z. En esta frecuencia la respuesta de la vibración es 1,5 veces superior a la que se obtendría con una masa pura rígida bajo las mismas condiciones de prueba.
- En el rango de 5 a 8 Hz, T decrece.
- Entre 8 y 15 Hz se presenta una nueva resonancia, aunque de menor valor.
- Sobre 15 Hz la transmisibilidad decrece por debajo de la unidad (lo que implica una atenuación del movimiento).

Las curvas de trazo continuo son las obtenidas con el modelo de la Fig. 2.1 8. El valor de T se ha obtenido como cociente entre la aceleración en m_1 y la aceleración en la base.

No existe correlación entre las masas y las partes anatómicas del cuerpo, aunque en análisis biodinámicos la masa m_1 puede tomarse como la cabeza.

Los valores de la Fig. 2.17 se han obtenido por estudios realizados en 50 personas con un peso medio de 75 kg y sometidas a aceleraciones senoidales en el rango de 2 a 4 m/s^2 .

Los datos experimentales indican que no existen diferencias en los valores de T para posturas de pie y sentado, por lo que solamente se presenta una curva para ambos.

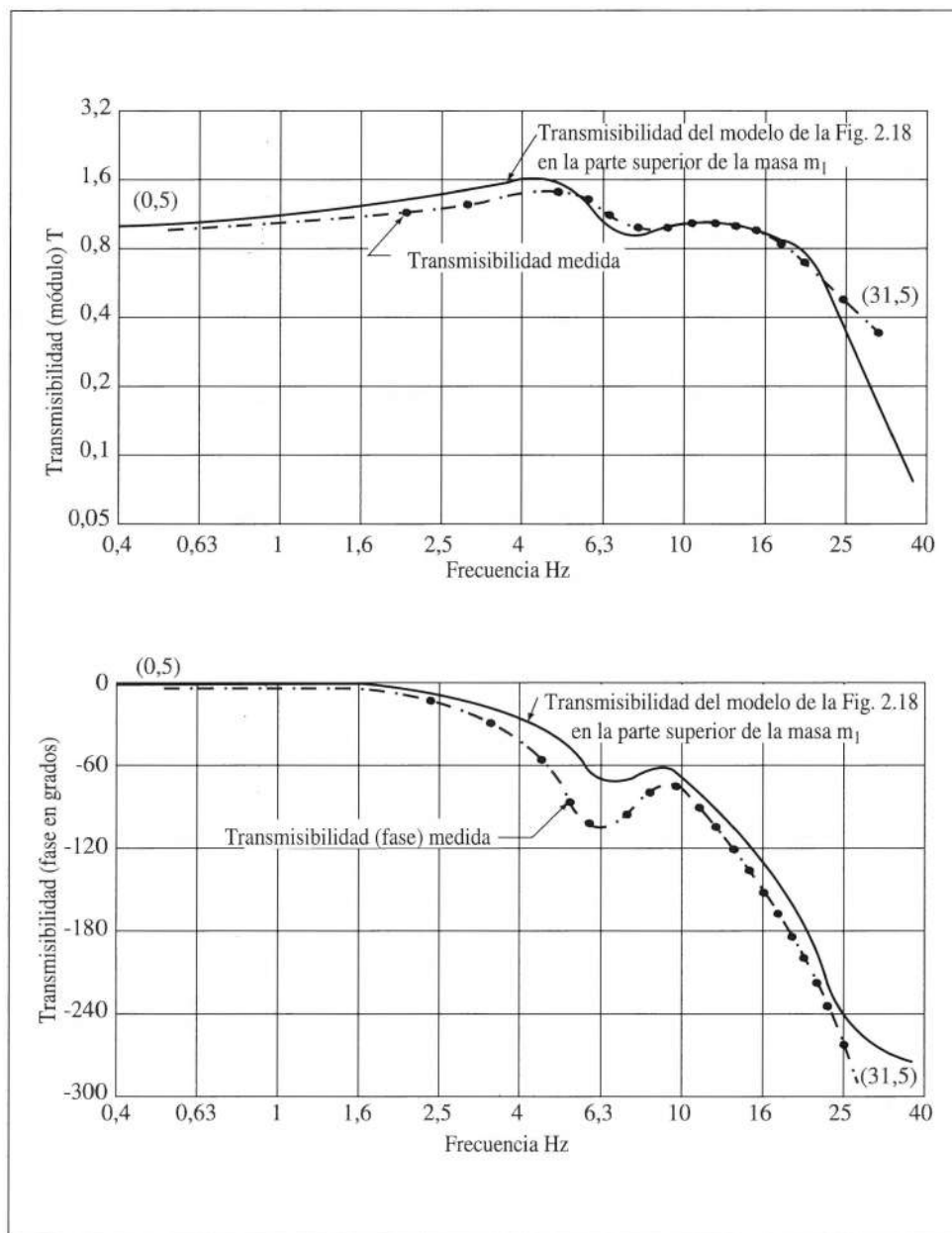


Fig. 2.17 Transmisibilidad típica de los seres humanos en posturas de pie y sentado según ISO 7962: 1987.

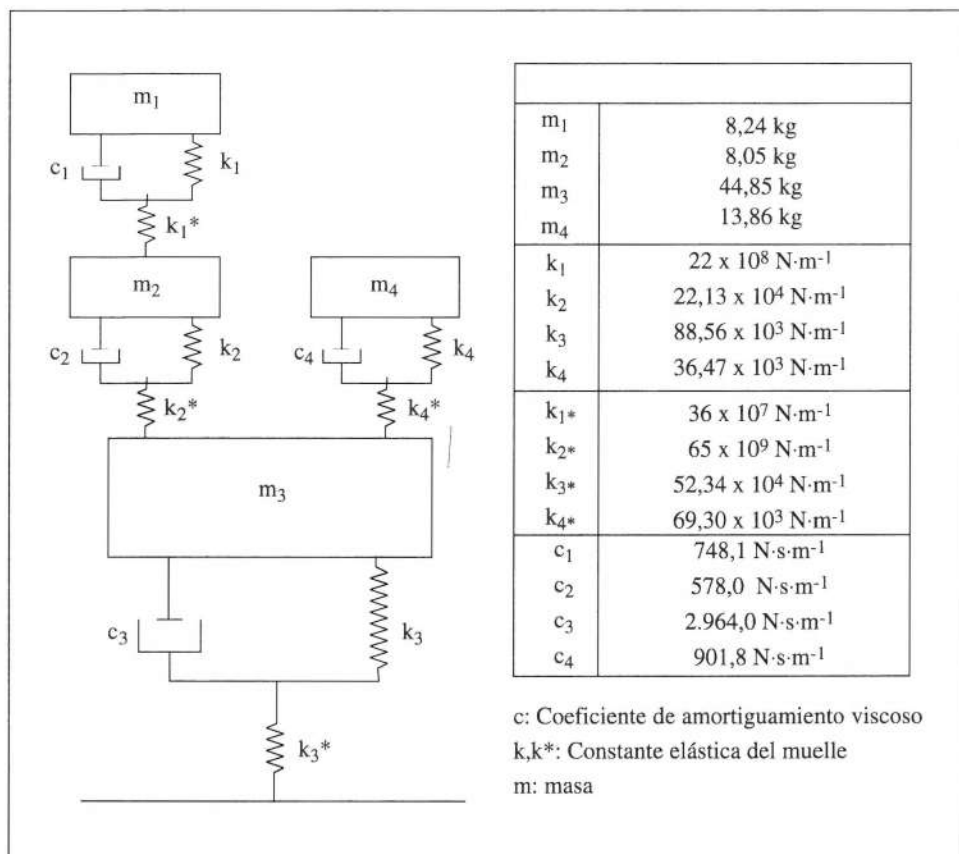


Fig. 2.18 Modelo propuesto para la transmisibilidad medida en el eje z para posturas de pie y sentado según ISO 7962: 1987.

2.11 PARÁMETROS DE MEDIDA DE LA VIBRACIÓN

Cuando el cuerpo humano está en contacto con un dispositivo mecánico que genera vibraciones, se desplaza una cierta cantidad sobre su posición estacionaria de referencia.

Por lo tanto, el **desplazamiento** podría ser un parámetro a utilizar para describir el fenómeno vibratorio.

Al ser un movimiento, también podría utilizarse la **velocidad** y la **aceleración**.

La relación entre desplazamiento, velocidad y aceleración, para una onda senoidal de vibración, se indica en la Fig. 2.19

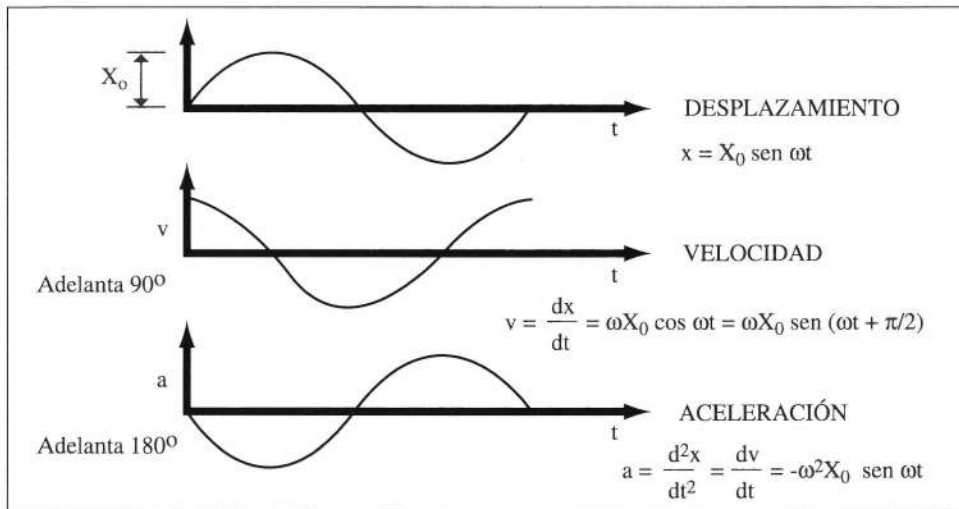


Fig. 2.19

Puede comprobarse en dicha figura que la **forma** y el **período** de la vibración es la misma independientemente de cuál sea el parámetro elegido: desplazamiento, velocidad o aceleración. Únicamente las fases de dichos parámetros son distintas, pero esto tiene poca importancia cuando se hacen medidas promediadas en el tiempo.

¿Cuál es el parámetro más indicado para el estudio de las vibraciones en el cuerpo humano?

Sin duda la aceleración, por los siguientes motivos:

- a) Los acelerómetros piezoeléctricos, que son los transductores de aceleración más utilizados, tienen importantes ventajas técnicas sobre otro tipo de transductores (sondas de proximidad, sondas de corriente de Focault, etc.), tales como:
 - Un elevado rango dinámico (típicamente 160 dB, es decir, una relación entre las señales máximas y mínimas detectadas de $10^8:1$)

- Elevada respuesta de frecuencia.
 - Gran fiabilidad a largo plazo por carecer de piezas móviles.
- b) Las Normas Internacionales ISO que tratan sobre las medidas de la vibración en el cuerpo humano requieren que el parámetro a medir sea la aceleración.
- c) Si se capta la aceleración, se pueden obtener, de una manera sencilla, mediante integradores electrónicos, los valores de la velocidad y desplazamiento. El integrador actúa como un filtro paso bajo, atenuando las frecuencias altas, según se indica en la Fig. 2.20.

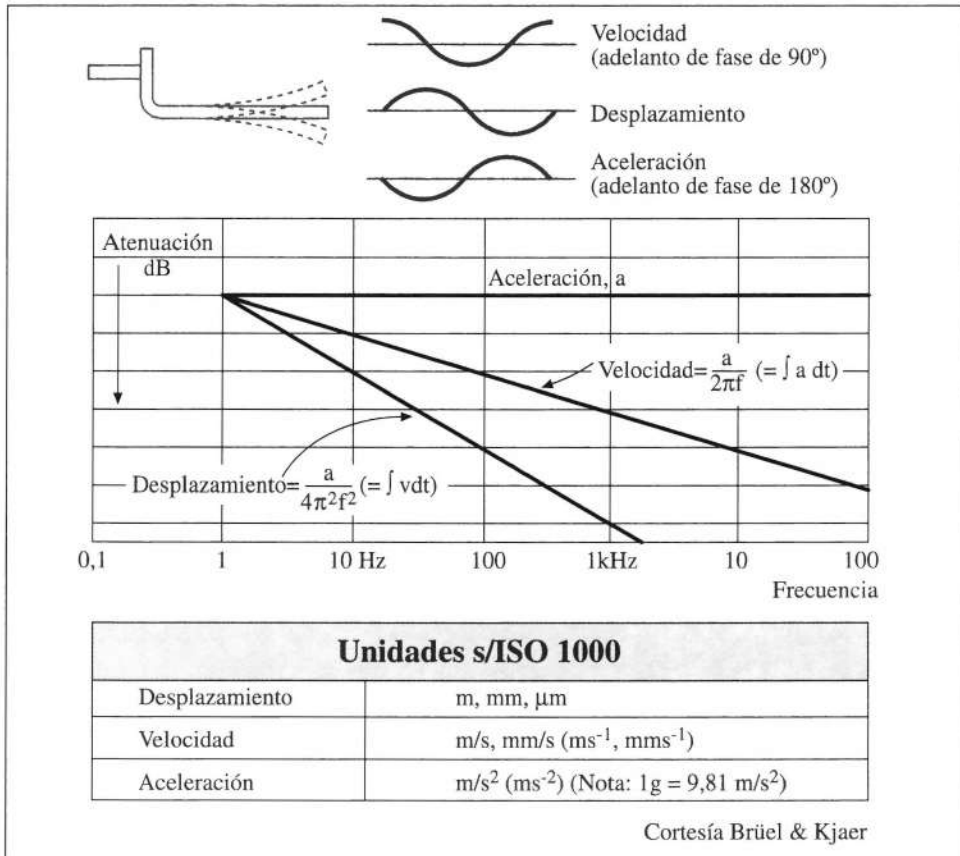


Fig. 2.20

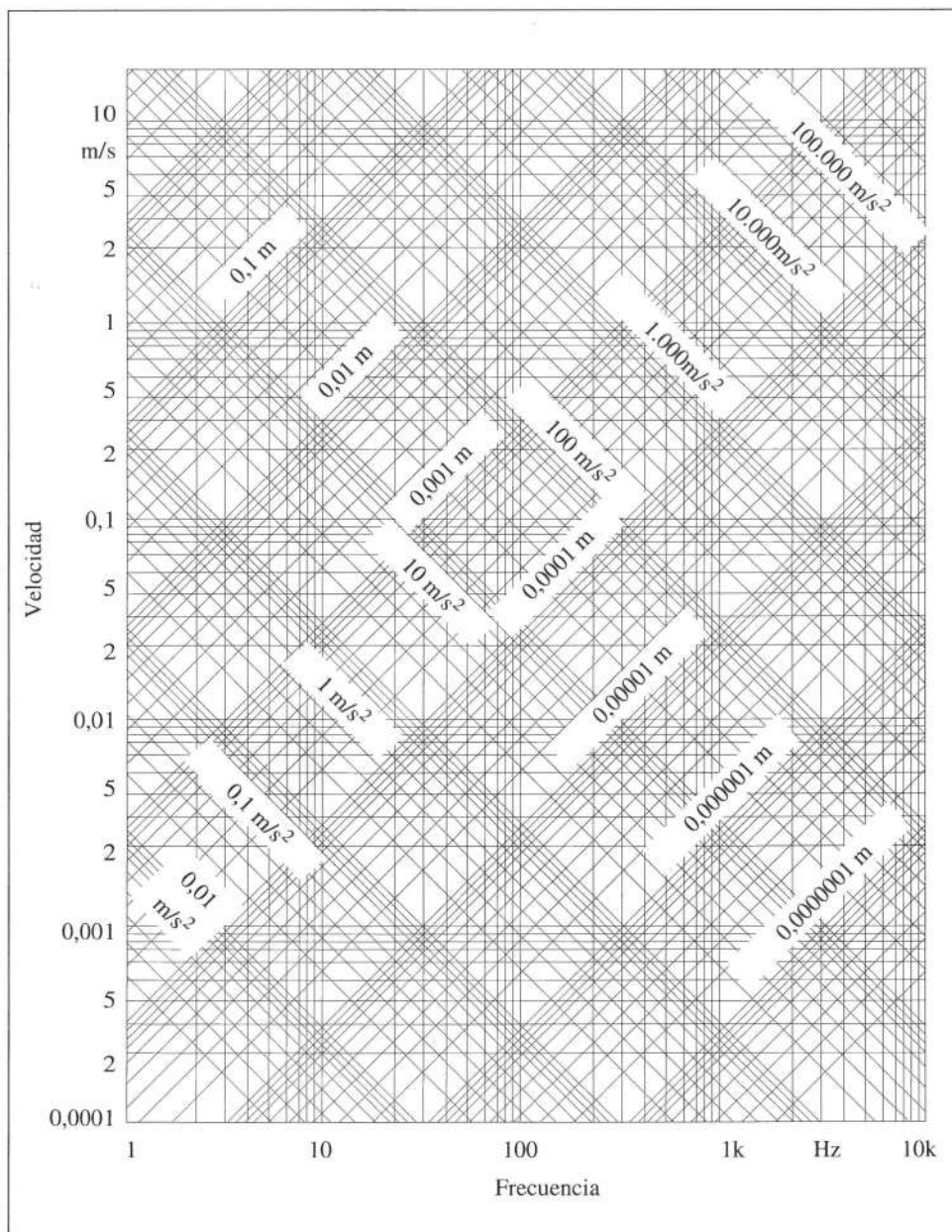


Fig. 2.21

Para la aceleración descrita en la Figura 2.19, tenemos:

$$x = X_0 \text{ sen } \omega t \quad (2.52)$$

$$v = \omega X_0 \cos \omega t = V_0 \cos \omega t \quad (2.53)$$

$$a = -\omega^2 X_0 \text{ sen } \omega t = A_0 \text{ sen } \omega t \quad (2.54)$$

es decir, la amplitud máxima de la velocidad es: $V_0 = \omega X_0 = 2 \pi f X_0$ (2.55) y la amplitud máxima de la aceleración es: $A_0 = -\omega^2 X_0 = -4 \pi^2 f^2 X_0$ (2.56).

Por lo tanto, si conocemos el desplazamiento total ($DT = 2.X_0$) de un cuerpo sometido a una vibración de frecuencia senoidal de frecuencia f , podemos obtener el valor de la aceleración máxima:

$$A_0 = 4 \pi^2 f^2 X_0 = 4 \pi^2 f^2 DT / 2 \quad (2.57)$$

Por ejemplo: Si el desplazamiento total es 0,04 mm y $f = 200$ Hz:

$$A_0 = 4 \pi^2 200^2 0,00004/2 = 31,58 \text{ m/s}^2$$

La figura 2.21 permite resolver gráficamente las ecuaciones 2.55 y 2.56

Es importante destacar que, en la ecuación 2.56, la aceleración máxima A_0 es proporcional a f^2 . En la práctica esto significa que, si conocemos el desplazamiento de un cuerpo que vibra con movimiento senoidal, pero desconocemos la frecuencia, tenemos poca información sobre la aceleración máxima a la que está sometido el cuerpo. Por ejemplo: un cuerpo sometido a una aceleración máxima de 1 g tendrá un desplazamiento total ($DT = 2.X_0$) igual a 124 mm, si la frecuencia es 2 Hz; 1,24 mm, si la frecuencia es 20 Hz; y 0,0124 mm, si la frecuencia es 200 Hz.

Si observamos el movimiento de una herramienta neumática, parece que existe poco desplazamiento, pero pueden existir altos niveles de aceleración debido a que tiene componentes de altas frecuencias. Sin embargo, observando las oscilaciones del asiento de una máquina de obras públicas, vemos valores considerables del desplazamiento, pero habrá bajas aceleraciones debido a los bajos valores de las frecuencias predominantes.

2.12 CUANTIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE VIBRACIÓN

Para cuantificar los niveles de una señal de vibración, se definen una serie de parámetros, en cierto modo similares a los utilizados para el ruido. Los más importantes son:

- Valor eficaz (rms).
- a_{eq} o L_{eq} .
- Valor pico máximo.
- Factor de cresta.

En la Figura 2.22 se indica una onda pura senoidal de aceleración con frecuencia $f = 1/T$ y valor máximo a_{pico} .

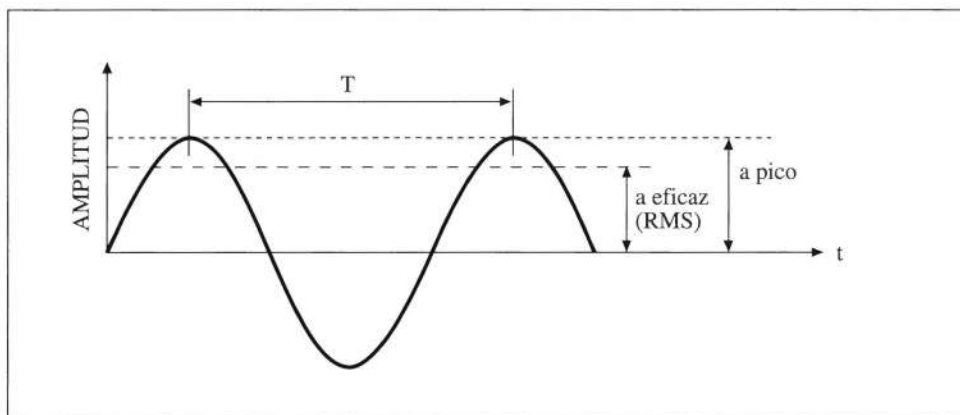


Fig. 2.22

2.12.1 VALOR EFICAZ (RMS)

Para caracterizar la vibración se utiliza comúnmente la aceleración en valor eficaz (valor rms) debido a que tiene una relación directa con el contenido de energía de la señal.

$$a \text{ en valor eficaz (rms)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (2.58)$$

Para la onda senoidal mostrada, el valor eficaz es:

$$a_{ef} (rms) = \frac{1}{\sqrt{2}} a_{pico} \quad (2.59)$$

La mayoría de las vibraciones que se encuentran en la vida diaria no son ondas senoidales puras. Normalmente varían ampliamente con el tiempo, tanto en frecuencia como en magnitud.

El valor rms de la aceleración puede obtenerse de dos formas:

- Mediante un promediado temporal de tipo exponencial
- Mediante un promediado temporal lineal

2.12.1.1 Aceleración rms promediada exponencialmente.

En este caso el valor del cuadrado de la aceleración instantánea se pondera por una función exponencial, con constante de tiempo τ (Fig. 2.23).

$$a_{rms,\tau} (t_0) = \left[\frac{1}{\tau} \int_0^{t_0} a^2(t) e^{\frac{t-t_0}{\tau}} dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.60)$$

En el promediado exponencial, la parte más reciente de la señal es la que tiene mayor influencia en el nivel promediado.

Igual que sucede en ruido, normalmente se utilizan las constantes de tiempo $\tau = 1s$ (slow) y $\tau = 1/8s$ (fast).

Los valores de la aceleración rms, promediada exponencialmente, también varían en el tiempo (Fig. 2.24), lo que implica que en algunos casos es difícil la valoración, en especial cuando se trata de largos períodos de tiempo.

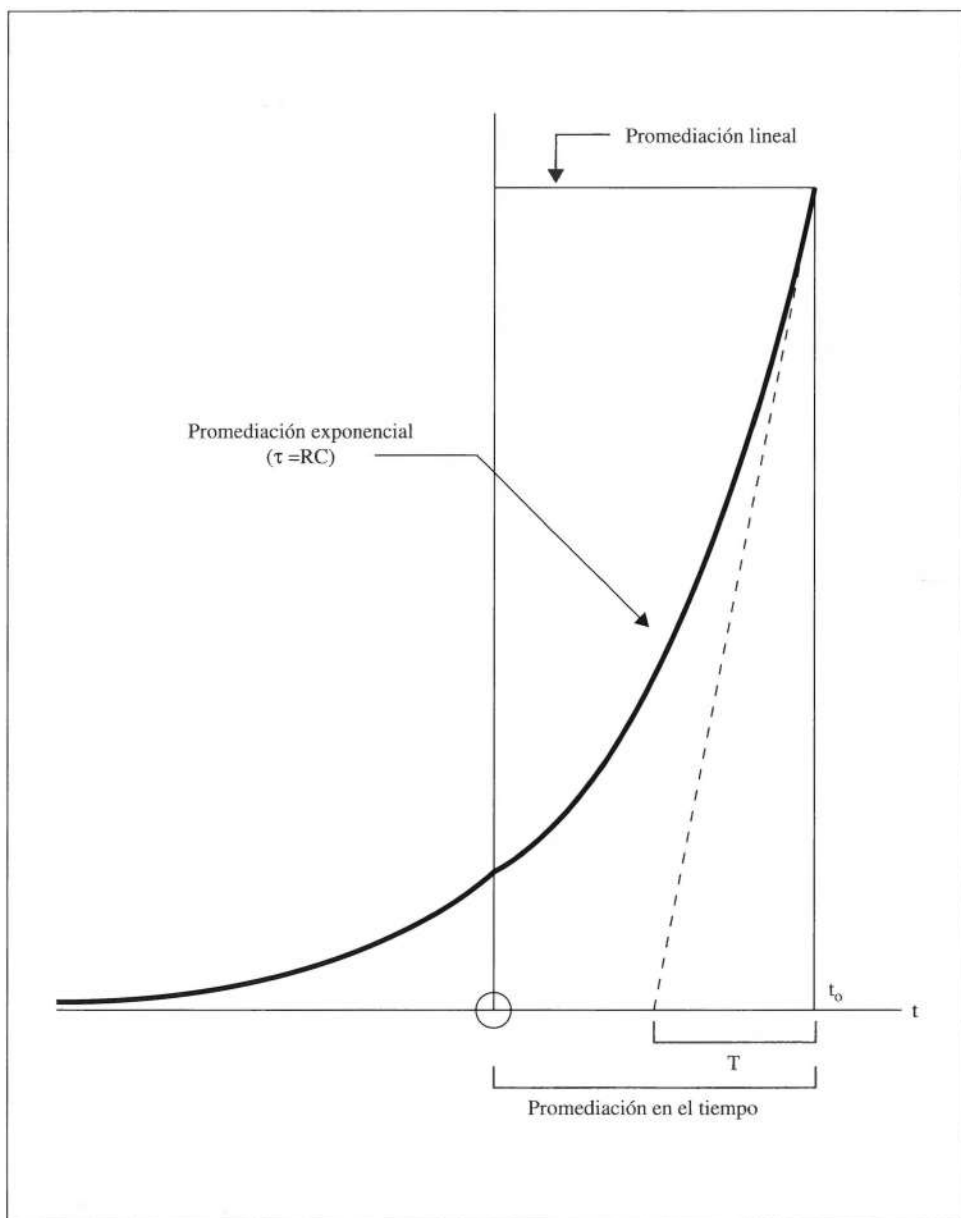


Fig. 2.23 Curvas de ponderación para integración lineal y exponencial según UNE ENV 28041:1993.

2.12.1.2 Aceleración continua equivalente.

Para solventar el problema citado en el párrafo anterior, se utiliza una ponderación temporal lineal (Fig. 2.23). En este caso todas las partes de la señal tienen igual influencia en el nivel promediado.

$$a_{eq}(T) = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.61)$$

En la figura 2.24 puede verse que, para el período de medida T, existen múltiples valores de a_{rms} promediada exponencialmente, pero un único valor de $a_{eq}(T)$

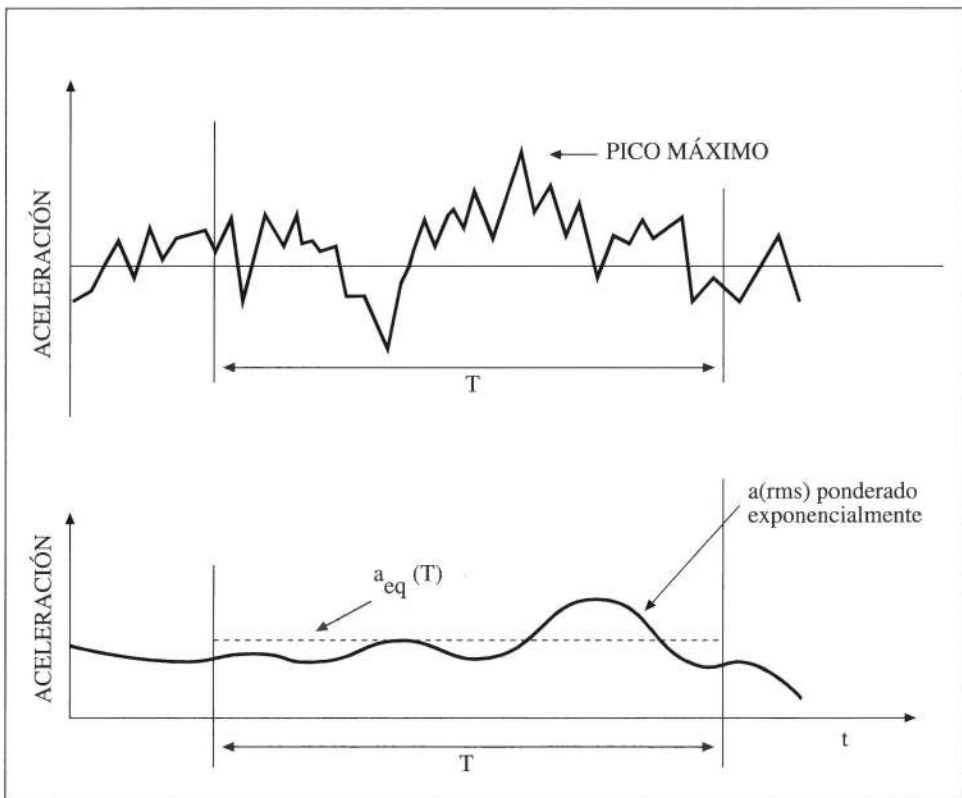


Fig. 2.24

2.12.2 VALOR PICO MÁXIMO Y FACTOR DE CRESTA

El pico máximo es el mayor valor de la aceleración durante el período de medida considerado.

Como factor de cresta se define el cociente entre el valor pico máximo y el valor eficaz (rms)(Fig. 2.25). Cuando el valor rms fluctúa, el valor de cresta puede obtenerse como el cociente entre el valor pico máximo y un valor a_{eq} . Se pueden elegir distintos períodos de tiempo, aunque 60 segundos es un valor adecuado.

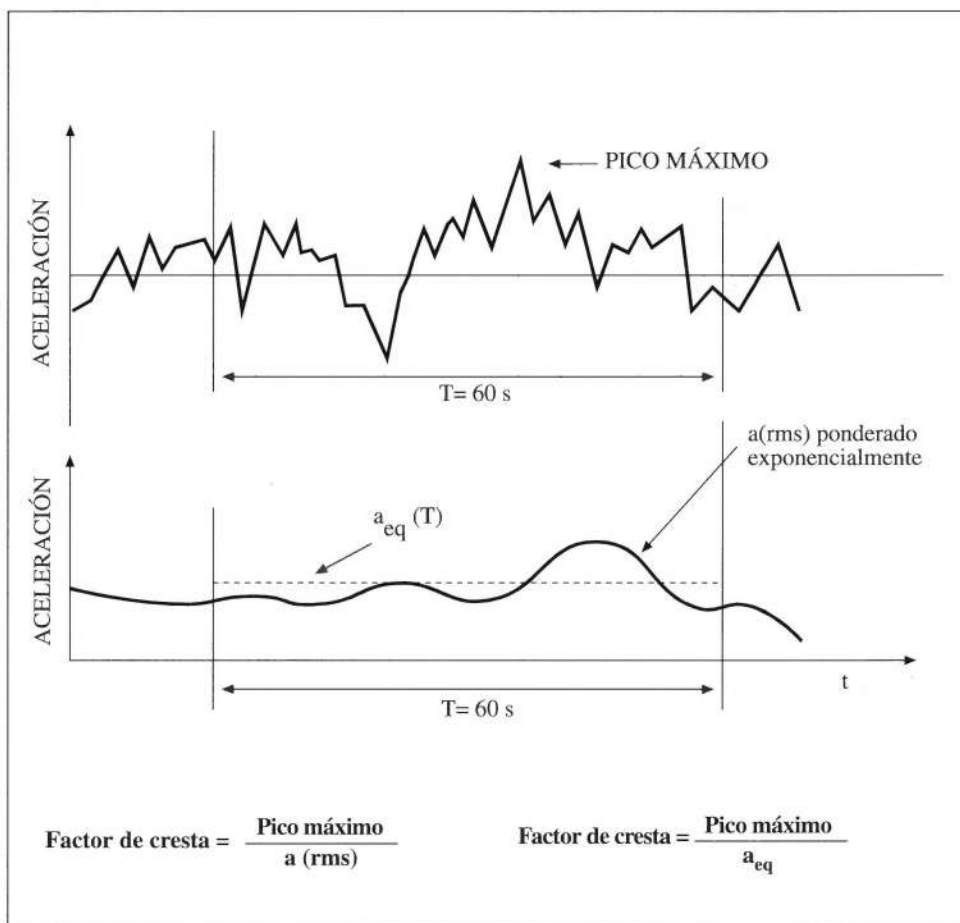


Fig. 2.25

2.12.3 LA ESCALA LOGARÍTMICA. EL DECIBELIO

Las medidas tomadas en una señal de vibración las podemos expresar en:

a) Unidades normales:

Desplazamiento: m

Velocidad: m/s

Aceleración: m/s^2

b) Escala logarítmica. (Figura 2.26)

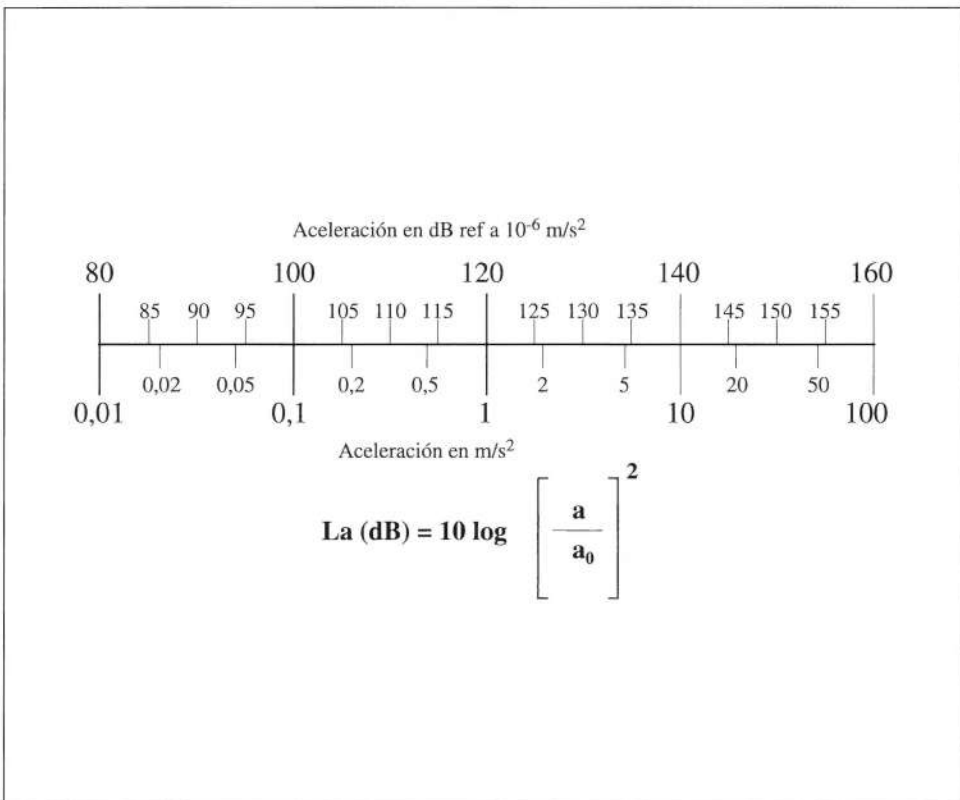


Fig. 2.26

Las tres unidades anteriores pueden expresarse en dB con respecto a una cantidad de referencia para cada una de ellas.

Referencias según ISO 1683:1983

$$L_a \text{ (dB)} = 10 \log \left(\frac{a}{a_0} \right)^2 \quad a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$$

$$L_v \text{ (dB)} = 10 \log \frac{V}{V_0} \quad V_0 = 10^{-9} \text{ m/s}$$

$$L_d \text{ (dB)} = 10 \log \frac{X}{X_0} \quad X_0 = 10^{-12} \text{ m}$$

Para una onda senoidal de pulsación $\omega = 1000 \text{ rad/s}$ ($f \simeq 159 \text{ Hz}$) las 3 amplitudes de referencia son numéricamente equivalentes:

$$x = X_0 \sin \omega T; \quad X_0 = 10^{-12} \text{ m}$$

$$v = dx/dt = \omega X_0 \cos \omega T; \quad \omega X_0 = 10^{-12} \cdot 10^3 = 10^{-9} \text{ m/s}$$

$$a = dv/dt = -\omega^2 X_0 \sin \omega T; \quad \omega^2 X_0 = 10^{-12} \cdot 10^6 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$$

Cuando se expresa un valor en dB, hay que decir con qué referencia se ha calculado. Por ejemplo, 110 dB referido a 10^{-6} m/s^2 .

Sin embargo, cuando se comparan amplitudes de vibración, puede utilizarse sólo el valor en dB admitiendo que ambos valores se refieren a una misma referencia.

Por ejemplo, es correcto decir que un nivel es superior a otro en 20 dB sin explicitar ninguna referencia.

La escala en dB tiene importantes ventajas:

- Traslada un factor **multiplicativo** de una escala a un factor **aditivo** de otra escala.

Por ejemplo: Una **multiplicación por 2** en una escala de aceleraciones en m/s^2 es siempre un **aumento de + 6 dB** en la escala logarítmica.

Una **multiplicación por diez** en la escala de aceleraciones en m/s^2 es siempre un **aumento de + 20 dB** en la escala logarítmica.

- El cuerpo reacciona logarítmicamente. Por ejemplo, si se dobla una señal aplicada, el cuerpo lo siente como un aumento de una cantidad constante. La variación de 1 a 2 m/s² se siente mucho más que la variación de 10 a 11 m/s².
- El rango dinámico de los transductores de aceleración es normalmente de 10⁸:1.

En la escala de dB, dicha variación es de 160 dB, con lo que trasladamos una escala de 100 millones de unidades a una de 160 unidades.

Por otra parte, los rangos de las aceleraciones manejadas usualmente en el estudio de la vibración, en el hombre, oscilan de 0,01 a 100 m/s², es decir, una escala de 10.000 unidades. Utilizando la escala en dB, este rango es de 80 a 160 dB, es decir, 80 unidades.

A pesar de estas ventajas, elegir la escala en m/s² o en dB es un asunto de criterio, ya que la información contenida es la misma.

Convencionalmente se admite que los valores de la aceleración en dB se designen por L , mientras que los valores en m/s² se designen con a .

2.12.3.1 Nivel de aceleración rms promediada exponencialmente.

La expresión 2.60 expresada en dB es:

$$L_{rms,\tau}(t_0) = 10 \log \left[\frac{1}{\tau} \int_0^{t_0} \frac{a^2(t)}{a_0^2} e^{\frac{t-t_0}{\tau}} dt \right] \text{ dB} \quad (2.62)$$

2.12.3.2 Nivel de aceleración continuo equivalente.

La expresión 2.61 expresada en dB es:

$$L_{eq}(T) = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{a^2(t)}{a_0^2} dt \right] \text{ dB} \quad (2.63)$$

Se puede obtener también el nivel de aceleración continuo equivalente por sumas de muestras L_i , siendo constante o aproximadamente constante para un intervalo t_i , mediante:

$$a_{eq,T} = a_0 \left[\sum_{i=1}^{i=n} \frac{t_i}{T} 10^{0,1 \cdot L_i} \right]^{1/2} \quad \text{donde } T = \sum_{i=1}^{i=n} t_i \quad (2.64)$$

2.12.3.3 Suma de aceleraciones en dB.

Hemos visto que

$$a \text{ en valor eficaz (rms)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt}$$

Siendo $a(t)$ el valor **instantáneo** de la aceleración.

Los valores instantáneos de dos aceleraciones pueden sumarse:

$$a_{\text{Total}} = a_1(t) + a_2(t) + \dots + a_n(t)$$

Los valores eficaces de 2 aceleraciones **no pueden sumarse directamente**:

$$a_{rms, \text{Total}} \neq a_{rms, 1} + a_{rms, 2} + \dots + a_{rms, n}$$

La suma real es:

$$a_{rms, \text{Total}}^2 = a_{rms, 1}^2 + a_{rms, 2}^2 + \dots + a_{rms, n}^2$$

Supongamos que tenemos varios valores de a_{rms} en dB.

$$L_{A1}, L_{A2}, \dots, L_{Ai}, \dots, L_{An}$$

¿Cuál es el valor suma en dB?

$$L_{Ai} = 10 \log \left(\frac{a_i}{a_0} \right)^2$$

$$a_i^2 = a_0^2 10^{\frac{L_{Ai}}{10}}$$

Al ser valores eficaces de la aceleración:

$$a_{Total}^2 = \sum_{i=1}^{i=n} a_i^2$$

$$a_{Total}^2 = a_0^2 \left[10^{\frac{L_{Ai}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{An}}{10}} \right] = a_0^2 \sum_i 10^{\frac{L_{Ai}}{10}}$$

Dividiendo por a_0^2 :

$$\frac{a_{Total}^2}{a_0^2} = \sum_{i=1}^{i=n} 10^{\frac{L_{Ai}}{10}}$$

Y tomando logaritmos:

$$\begin{aligned} 10 \log \frac{a_{Total}^2}{a_0^2} &= 10 \log \sum_{i=1}^{i=n} 10^{\frac{L_{Ai}}{10}} \\ L_{A_{Total}} (dB) &= 10 \log \sum_{i=1}^{i=n} 10^{\frac{L_{Ai}}{10}} \end{aligned} \quad (2.65)$$

2.13 VALORES ENCONTRADOS EN LAS VIBRACIONES QUE AFECTAN A LOS SERES HUMANOS

En la Figura 2.27 se indican los valores en m/s^2 o dB (referidos a $10^{-6} m/s^2$) de distintas vibraciones que afectan al hombre.

El rango de interés para vibraciones mano-brazo es de 1 a $100 m/s^2$ (120 a 160 dB).

Para vibraciones de cuerpo entero en vehículos, el rango es de 0,1 a $10 m/s^2$ (100 a 140 dB).

En el caso de vibraciones de cuerpo entero en edificios, el rango de interés va de 0,001 a 0,1 m/s^2 , es decir, de 60 a 100 dB.

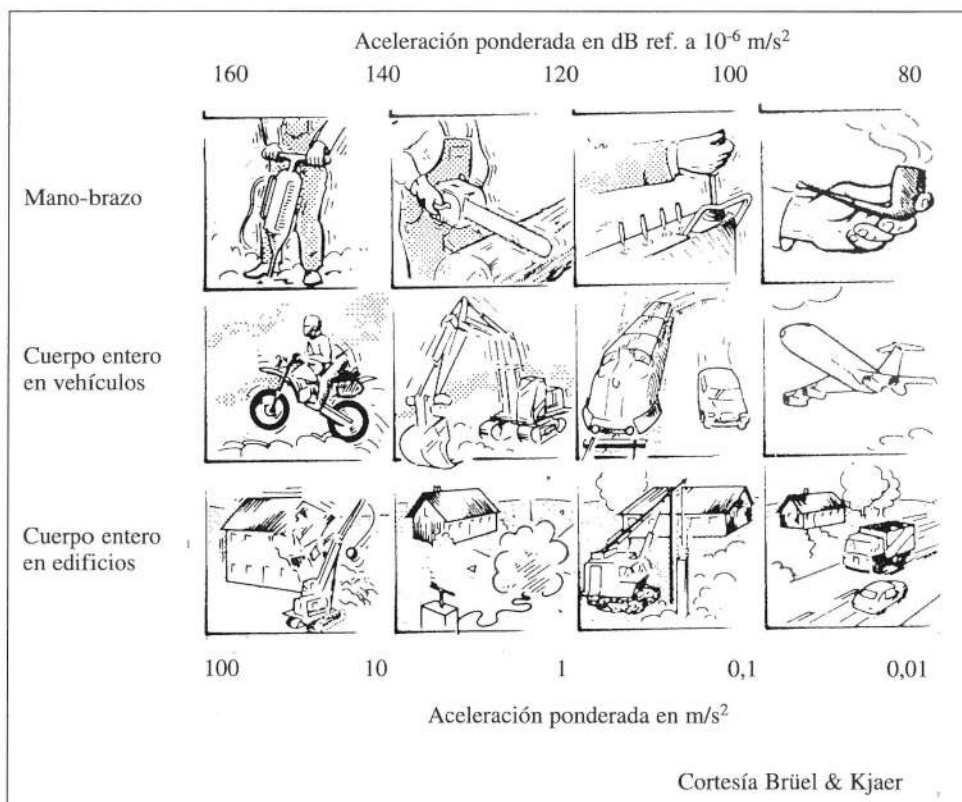


Fig. 2.27

CAPÍTULO 3

MEDIDA DE LAS VIBRACIONES

3.0 INTRODUCCIÓN

La medida de las vibraciones permite determinar las vibraciones transmitidas a los trabajadores por el uso de herramientas manuales vibrantes (guiadas y sostenidas), por la conducción de vehículos industriales, etc. que pueden ocasionar daños para la salud.

La Norma UNE ENV 28041:1994 (ISO 8041:1990)¹ fija los requisitos relativos de la instrumentación adecuada para evaluar las vibraciones a las cuales están expuestos los trabajadores en sus lugares de trabajo.

3.1 VIBRÓMETROS

Un vibrómetro es un instrumento de medida diseñado y construido para medir la magnitud de la vibración.

Básicamente, un sistema de medida de vibraciones consta de un transductor, en contacto con la superficie vibrante (asiento, empuñadura, suelo, etc.), que convierte las vibraciones mecánicas en una señal eléctrica, y de un equipo que trata esta señal adecuadamente, dando un valor de dicha aceleración, en las unidades pertinentes.

En la Fig 3.1 se representa un esquema sencillo de un vibrómetro en forma de diagrama de bloques.

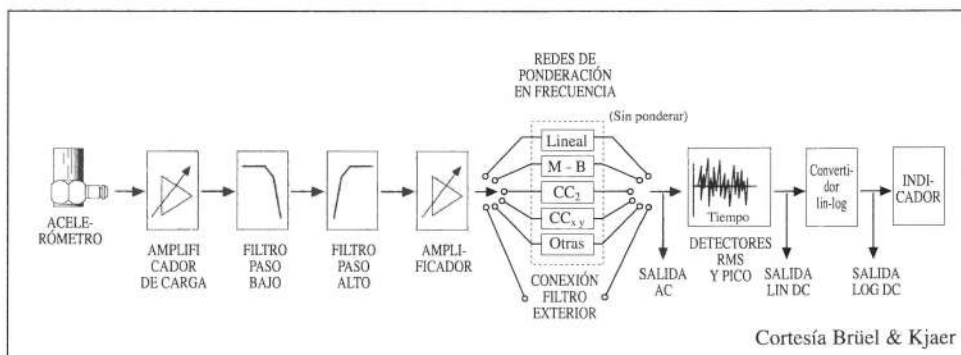


Fig. 3.1

¹ Actualmente en proceso de revisión.

Este sistema básico de medida es común para las medidas de vibraciones mano-brazo y cuerpo completo. La diferencia estriba en el rango de medida y en el filtro de ponderación a usar.

3.2 ELEMENTOS COMPONENTES DE UN VIBRÓMETRO

A continuación se detallan las características más importantes de cada uno de los elementos componentes de un vibrómetro:

3.2.1 ACELERÓMETRO

El acelerómetro es un transductor electromecánico adherido a la superficie vibrante que produce en sus terminales de salida un voltaje (o carga) proporcional a la aceleración a que está sometido.

Los acelerómetros más comunes son los piezoeléctricos. En conjunto, presentan mejores características que cualquier otro tipo de transductor.

Sin lugar a dudas es el componente más importante del equipo de medida y por tanto su elección es fundamental.

3.2.1.1 Funcionamiento.

Un acelerómetro piezoeléctrico se compone de una o varias masas sísmicas y uno o varios elementos piezoeléctricos, todos ellos montados sobre una base.

En la Fig 3.2 se puede ver una vista seccionada de un acelerómetro piezoeléctrico de Brüel & Kjaer.

En general, se fabrican dos tipos de acelerómetros piezoeléctricos:

- * De Cortadura: la masa sísmica ejerce una fuerza de cortadura sobre el elemento activo piezoeléctrico.

- * De Compresión: la masa sísmica ejerce una fuerza de compresión sobre el elemento activo piezoelectrico.

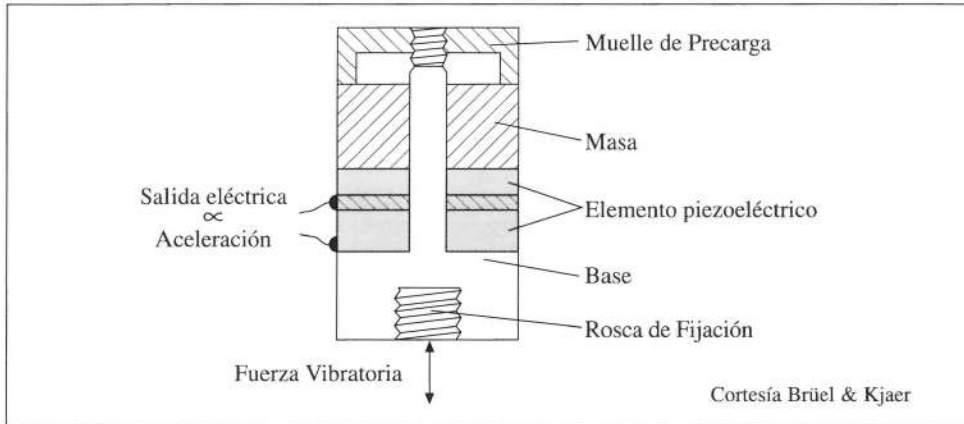


Fig. 3.2

En la Fig 3.3 se representan en sección estos dos tipos de acelerómetros piezoelectricos:

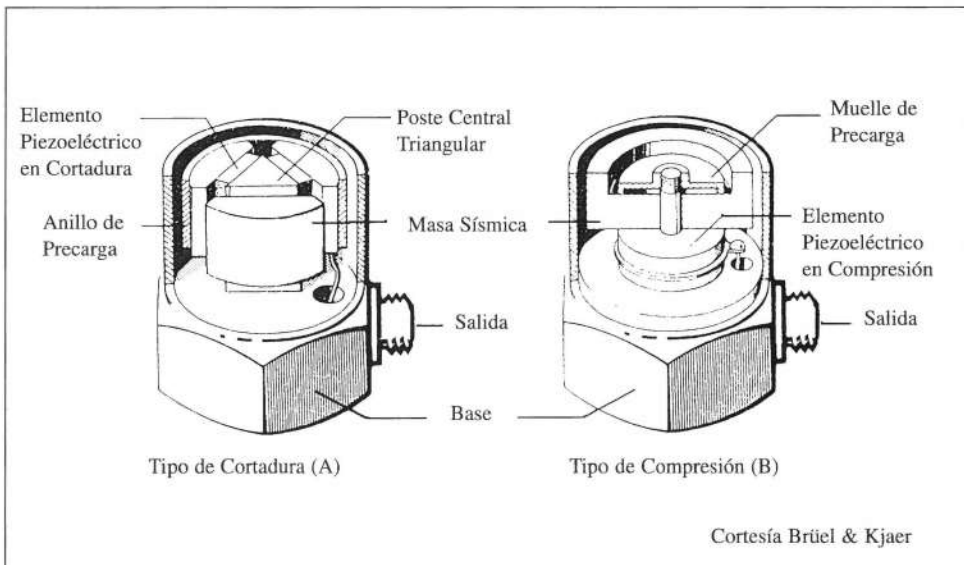


Fig. 3.3

El núcleo del acelerómetro es una lámina de material activo de ordinario, cerámica piezoeléctrica polarizada artificialmente, con un acentuado carácter piezoeléctrico. (Fig 3.4)

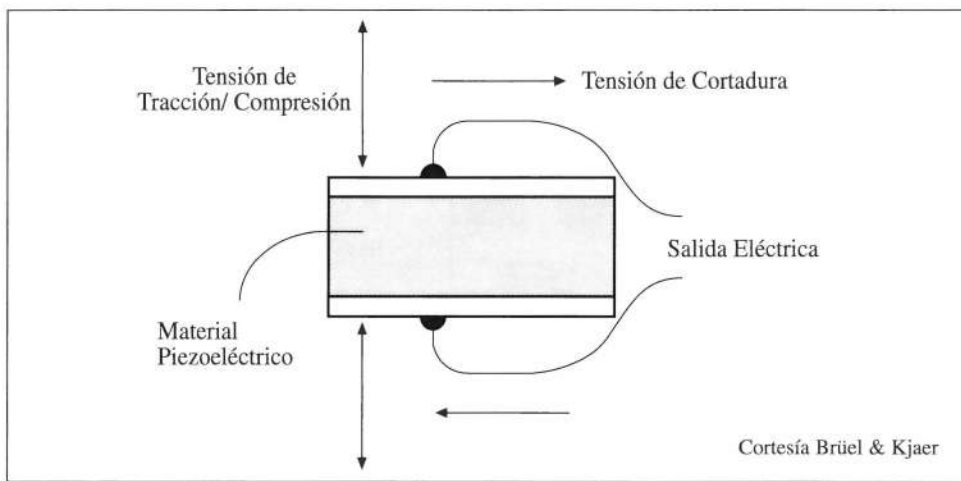


Fig. 3.4

El elemento piezoeléctrico actúa como un muelle que conecta la masa sísmica a la base del acelerómetro, de modo que, cuando se somete a una vibración al acelerómetro, la masa aplica sobre el elemento piezoeléctrico una fuerza que es proporcional a la aceleración de la vibración.

$$\text{Fuerza} = \text{Masa} \times \text{Aceleración}$$

Los materiales piezoeléctricos tienen la propiedad de generar cargas eléctricas entre sus caras polarizadas cuando se les somete a tensiones mecánicas (por tracción, compresión o cortadura). La carga generada es proporcional a la fuerza aplicada, es decir, produce en sus terminales una salida de voltaje (o carga) proporcional a la aceleración a la que está sometido. Por tanto, los acelerómetros piezoeléctricos no necesitan suministro eléctrico exterior al ser generadores de cargas.

Para un rango de frecuencia amplio, las masas sísmicas aceleran con igual magnitud y fase que la base del acelerómetro por lo que la salida del acelerómetro es proporcional a la aceleración de la base y, consecuentemente, a la aceleración de la superficie en la que están montados.

Sin embargo, hay que destacar que, para ciertas frecuencias, las masas sísmicas y la base del acelerómetro no aceleran de igual modo, limitando el rango de frecuencias.

3.2.1.2 Características de los acelerómetros piezoeléctricos.

Existe en el mercado una amplia gama de acelerómetros, siendo fundamental en su elección considerar las siguientes características:

3.2.1.2.1 Sensibilidad.

Como se ha indicado anteriormente, un acelerómetro piezoeléctrico es un dispositivo autogenerador de energía eléctrica, siendo la salida eléctrica proporcional a la aceleración.

Se denomina sensibilidad del acelerómetro a la relación entre la salida eléctrica que se produce y la aceleración que actúa sobre él.

Dicha salida eléctrica puede ser expresada en forma de carga o de voltaje, es decir, en pC o mV por m/s².

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\text{pC}}{\text{m/s}^2} \quad \text{ó} \quad \frac{\text{mV}}{\text{m/s}^2}$$

La sensibilidad depende de las características piezoeléctricas del material de los elementos piezoeléctricos y del tamaño de la masa.

Normalmente una alta sensibilidad obliga a un conjunto piezoeléctrico relativamente grande y, en consecuencia, una unidad relativamente grande y pesada. Por tanto, hay que llegar a un compromiso entre la sensibilidad y el tamaño del acelerómetro. (véase apartado 3.2.1.2.2).

En la Fig 3.5 se observa cómo, a medida que aumenta el tamaño de los acelerómetros, aumenta la sensibilidad.

En circunstancias normales, la sensibilidad no es un problema crítico, porque los modernos amplificadores pueden aceptar estos bajos niveles de señal.

Es importante que el acelerómetro mantenga su sensibilidad a lo largo del tiempo.

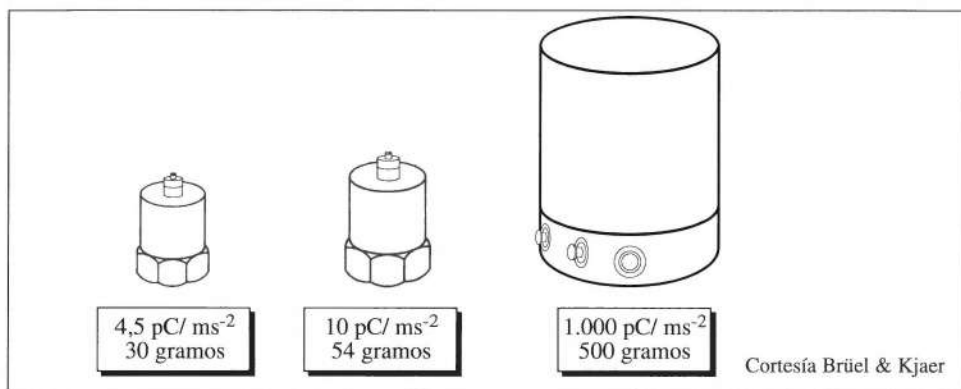


Fig. 3.5

3.2.1.2.2 Masa del acelerómetro.

Cuando se fija el acelerómetro a una superficie vibrante, las características vibracionales de la superficie se alteran. Por tanto, cuanto más ligero sea el acelerómetro, menor error se introduce.

Como regla general, la masa del acelerómetro debería ser lo más baja posible, idealmente menos de un 10 % de la masa dinámica del objeto sobre el que está montado. (Fig 3.6).

En general, los acelerómetros piezoeléctricos presentan un elevado valor del cociente entre la sensibilidad y la masa.

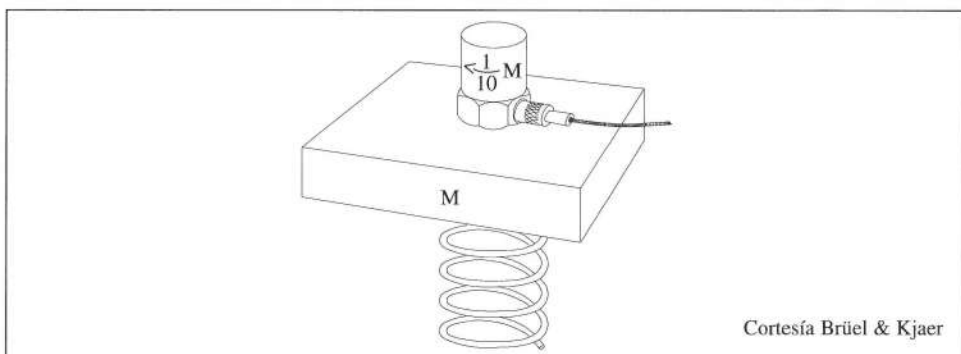


Fig. 3.6

3.2.1.2.3 Rango dinámico.

Cuando se pretende medir niveles de aceleraciones muy grandes o muy pequeñas, hay que conocer el rango dinámico del acelerómetro.

Se denomina rango dinámico a la diferencia entre los límites superior e inferior de aceleración, dentro del cual el acelerómetro responde linealmente. (Fig 3.7)

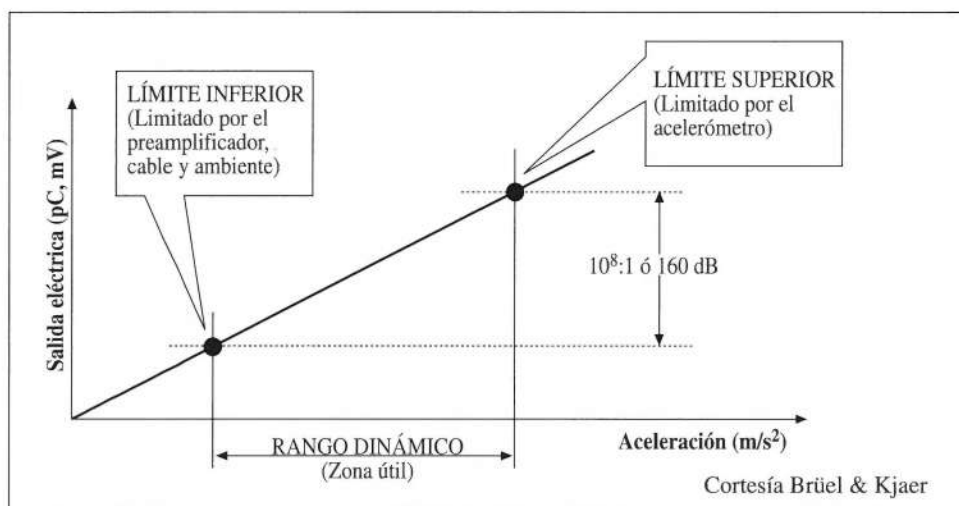


Fig. 3.7

El límite inferior viene determinado por el ruido eléctrico de fondo procedente de los cables de conexión y del circuito del amplificador. Normalmente no está determinado directamente por el acelerómetro. Este límite suele ser de sólo una centésima de m/s^2 con acelerómetros de aplicación general.

El límite superior viene determinado por la resistencia estructural del acelerómetro. Un acelerómetro típico de aplicación general es lineal de 50.000 hasta 100.000 m/s^2 , del orden de los choques mecánicos. Un acelerómetro diseñado para medir choques mecánicos puede ser lineal hasta 1000 Km/s^2 .

El acelerómetro piezoeléctrico es un transductor de aceleración extremadamente lineal en un rango que típicamente alcanza 160 dB, es decir, la relación entre la aceleración máxima y mínima que puede ser medida linealmente es de $10^8:1$.

3.2.1.2.4 Respuesta en frecuencia de un acelerómetro.

A la curva de variación de la sensibilidad con la frecuencia se la denomina respuesta en frecuencia del acelerómetro.

Es importante que el acelerómetro mantenga constante su sensibilidad para todo el rango de frecuencias de interés. Por tanto, hay que asegurarse, al adquirir un acelerómetro, de que el rango de frecuencia del acelerómetro da una salida válida sobre la gama de interés.

En la Fig 3.8 se representa gráficamente la variación de la sensibilidad con la frecuencia para un acelerómetro. En ella puede verse que la utilización de un acelerómetro depende de:

1. El límite inferior del rango de frecuencias, que viene determinado por la frecuencia de corte baja del amplificador que le sigue en la cadena de medida, aunque normalmente no es un problema porque suele estar bastante por debajo de 1 Hz. También depende de las fluctuaciones de la temperatura ambiente a las que es sensible el acelerómetro.
2. El límite superior del rango de frecuencia, que viene determinado por la frecuencia de resonancia del sistema masa-muelle del mismo acelerómetro. A esta frecuencia, el acelerómetro presenta un aumento de su sensibilidad.

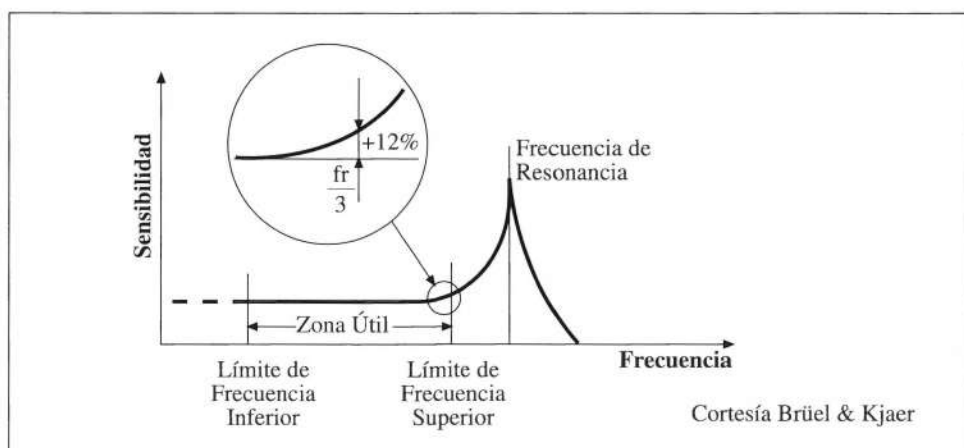


Fig. 3.8

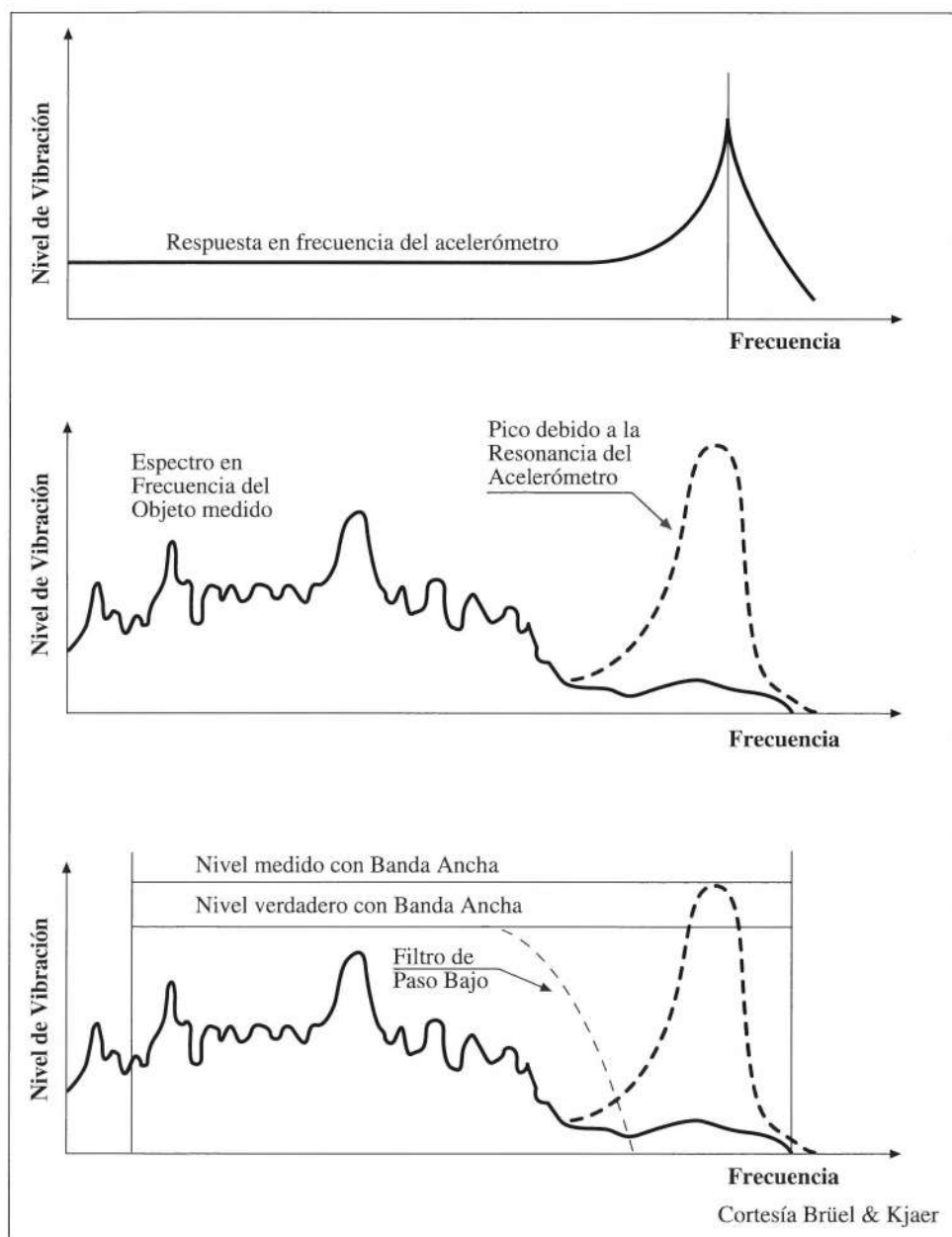


Fig. 3.9

En la práctica de las medidas de vibraciones se pueden cometer errores cuando se toman medidas en banda ancha que incluyan la frecuencia de resonancia del acelerómetro. El resultado será falso si la vibración a medir tiene frecuencias componentes en la zona en torno a la resonancia.

En general se suele fijar el límite de frecuencia superior en $1/3$ de la frecuencia de resonancia del acelerómetro. De este modo el error cometido no supera el 12 %.

También se puede evitar la señal indeseada producida por la resonancia del acelerómetro utilizando en los vibrómetros y amplificadores un filtro de paso bajo, que deja pasar sólo la señal que está por debajo de la frecuencia determinada por el filtro. (véase apartado 3.2.3). (Fig 3.9).

Cuando las medidas se limitan a bajas frecuencias, las altas y los efectos de resonancia se pueden eliminar con filtros mecánicos. Estos constan de elementos elásticos de goma pegados entre dos discos de montaje, que se colocan entre el acelerómetro y el punto de medida. Reducen el límite de frecuencia superior, típicamente entre 0.5 y 5 kHz.

Cuando hay que realizar la medida sobre herramientas percutoras, los acelerómetros deben dar una respuesta adecuada a los valores pico esperados. A veces, aunque se disponga del acelerómetro adecuado para tales niveles, se puede producir una distorsión de la señal de aceleración, conocida como “dc shift” (Fig 3.10A), dando como resultado importantes errores en el análisis de las componentes de baja frecuencia de la señal. Para evitar este problema los filtros mecánicos son, particularmente, válidos porque reducen la aceleración de impulso que puede causar *dc shift* (Fig 3.10B).

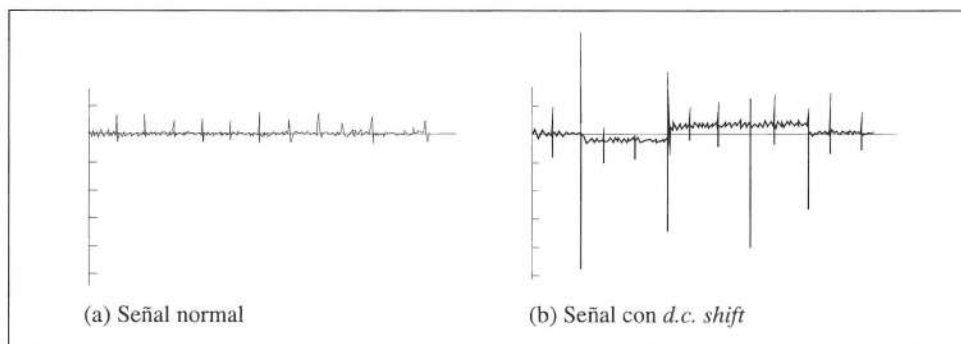


Fig. 3.10 A

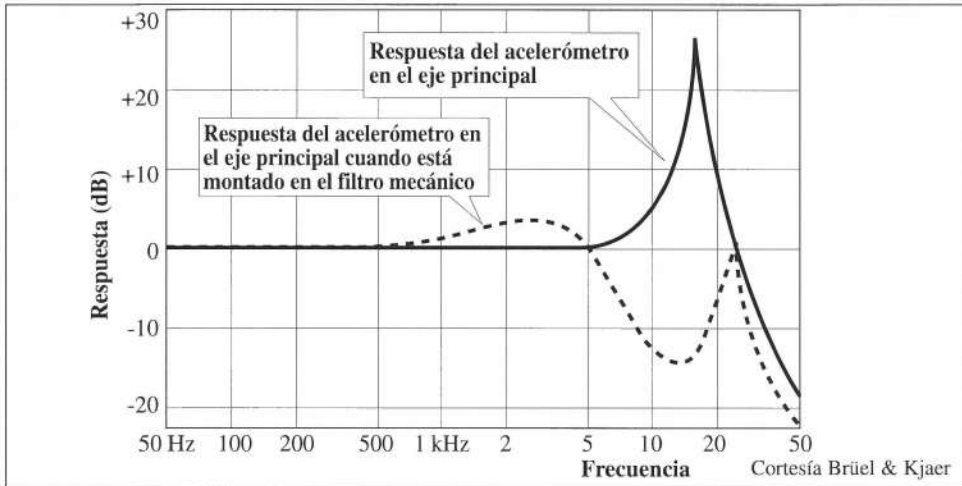


Fig. 3.10 B

Como se observa en la siguiente figura, a menor tamaño de acelerómetro, menor sensibilidad, frecuencia de resonancia más alta y, por tanto, más amplitud de campo de utilización. De ahí que la elección de un acelerómetro estará condicionada por el resultado que se desee obtener en cuanto a versatilidad o calidad. En la Fig 3.11 se representan las curvas de respuesta en frecuencia de distintos acelerómetros de Brüel & Kjaer.

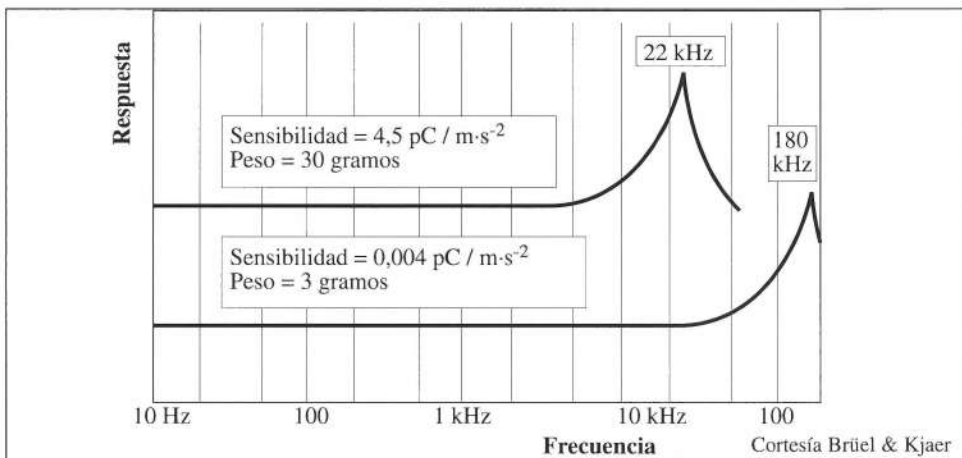


Fig. 3.11

3.2.1.2.5 Sensibilidad transversal del acelerómetro.

Los acelerómetros piezoeléctricos son sensibles a las vibraciones que se producen en direcciones distintas de las del eje principal.

La sensibilidad transversal de un acelerómetro es su sensibilidad a las aceleraciones en un plano perpendicular al del eje principal. El eje transversal tiene la mínima sensibilidad (idealmente cero).

El fabricante debe especificar el eje principal de sensibilidad y la sensibilidad transversal. En la Fig 3.12 se muestra un acelerómetro con su eje principal y dos ejes transversales perpendiculares entre sí. Se puede indicar el eje transversal mediante un punto rojo en el acelerómetro.

Normalmente, los fabricantes expresan la magnitud de la sensibilidad transversal como el valor máximo de dicha sensibilidad en porcentaje sobre la sensibilidad del eje principal y un gráfico con el porcentaje de dicho valor en función del ángulo de que se trate. Un valor típico de la máxima sensibilidad transversal es 4 %.

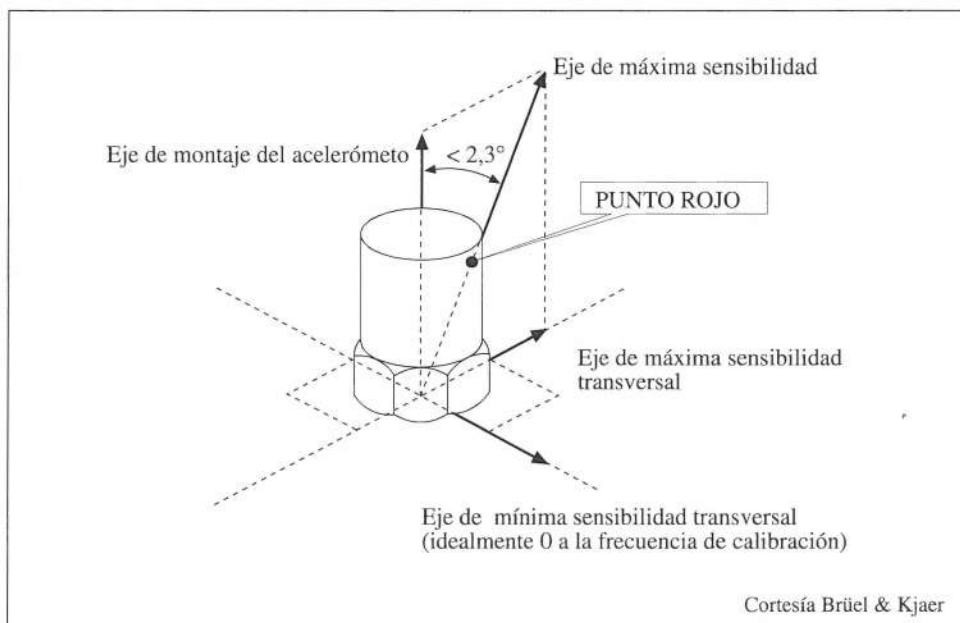


Fig. 3.12

3.2.1.3 Tipos de acelerómetros piezoeléctricos.

En general, los acelerómetros piezoeléctricos presentan una serie de propiedades que los hacen ser los transductores más adecuados para la medida de vibraciones. Presentan unos rangos de frecuencia y dinámico muy amplios, permanecen estables sus características durante largos períodos de tiempo, no necesitan suministro eléctrico externo al ser generadores de cargas eléctricas, no tienen partes móviles que se desgasten y, finalmente, su salida proporcional a la aceleración puede ser integrada electrónicamente para dar señales proporcionales a la velocidad y al desplazamiento.

Ahora bien, según las características específicas que presentan, cada uno de los acelerómetros piezoeléctricos son más adecuados para un determinado campo de aplicación. En la Fig 3.13 se pueden observar diferentes tipos de acelerómetros de la casa Brüel & Kjaer según el uso para el que están diseñados.

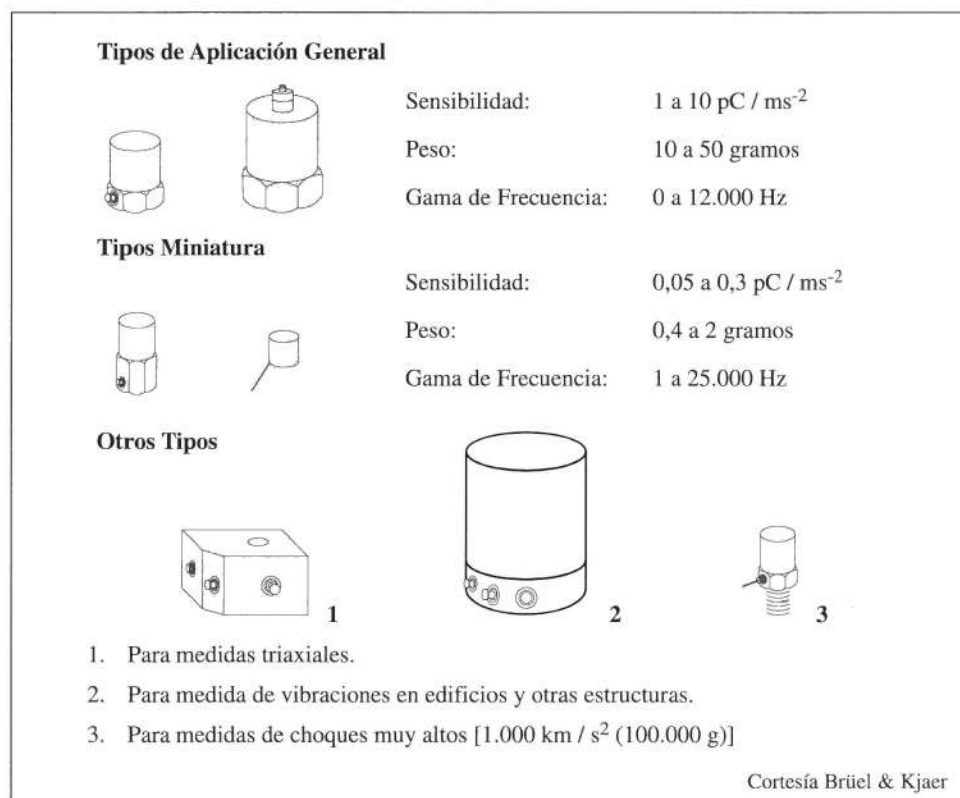


Fig. 3.13

Los de aplicación general son las más ampliamente utilizados.

Los de tipo miniatura están pensados para medidas de altos niveles, o a altas frecuencias, y empleo en estructuras delicadas, paneles, etc.

Otros tipos son óptimos para aplicaciones especiales. Por ejemplo, el tipo para medidas triaxiales tiene una aplicación directa en el campo de las vibraciones de cuerpo completo.

3.2.1.4 Influencias ambientales.

3.2.1.4.1 Temperatura.

Todos los materiales piezoeléctricos presentan dependencia de la temperatura. Los cambios de temperatura ambiente se traducen en cambios de sensibilidad del acelerómetro.

Por ello, es importante suministrar la curva de temperatura/sensibilidad para poder corregir los niveles leídos cuando las medidas se realicen a temperaturas significativamente distintas de los 20 °C. (Fig 3.14)

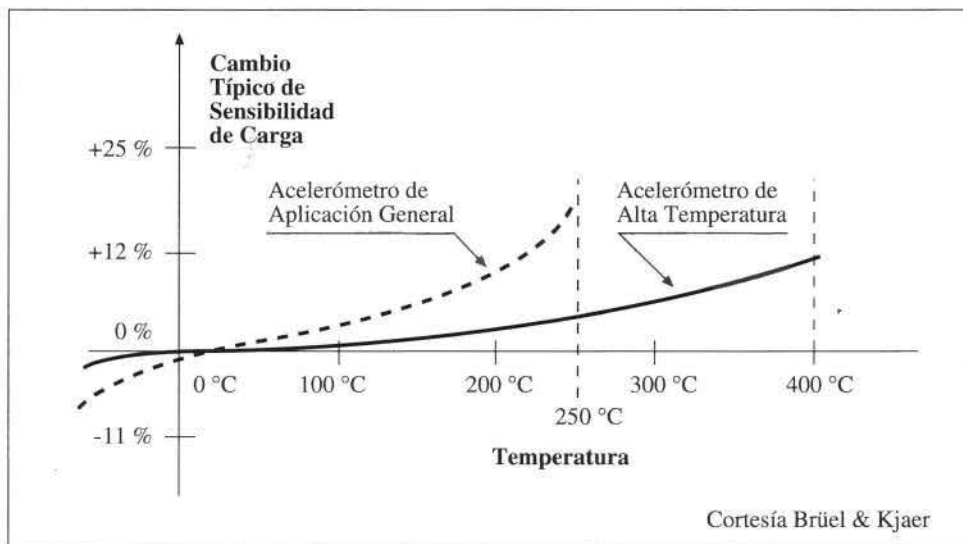


Fig. 3.14

3.2.1.4.2 Ruido de fricción.

A veces, el ruido de fricción se induce en el cable de conexión del acelerómetro por el movimiento del mismo cable cuando vibra. Se debe a variaciones locales de capacidad y carga producidas por la flexión, compresión y tensión dinámicas de las capas que forman el cable. El problema se evita con cables de acelerómetros grafitados y fijándolos, o pegándolos, lo más cerca del acelerómetro que se pueda. (Fig 3.15)

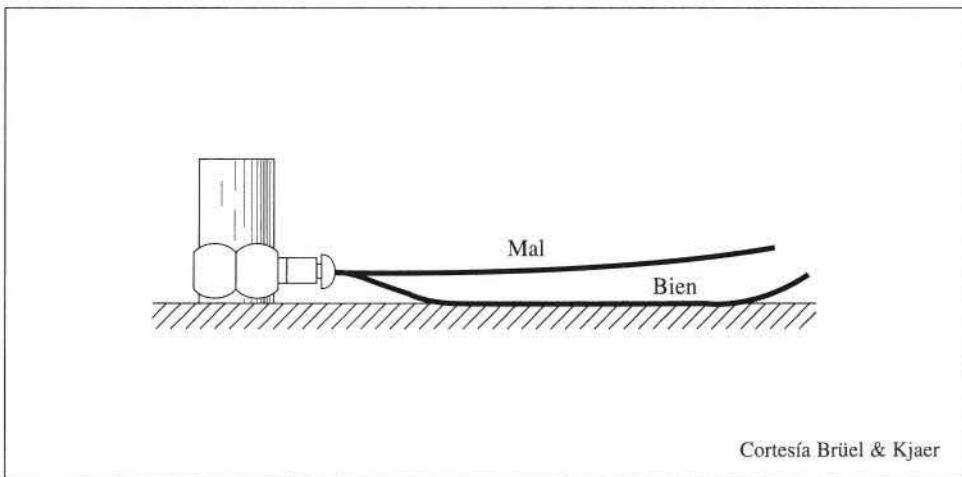


Fig. 3.15

3.2.1.5 Calibración de los acelerómetros.

Las instrucciones relativas a la calibración de los transductores vienen indicadas en la Norma ISO 5347-0:1987.

Cada acelerómetro tiene su sensibilidad y debe disponer de su carta de calibración. (Fig 3.16). Siempre que los acelerómetros se conserven y empleen dentro de sus límites ambientales especificados, sufrirán cambios mínimos de sus características en largos períodos de tiempo.

Sin embargo, cuando sea posible, se debe usar un calibrador o alguna entrada de aceleración conocida que permita confirmar la sensibilidad del acelerómetro y proporcionar un chequeo completo del acelerómetro y del equipo de medida.

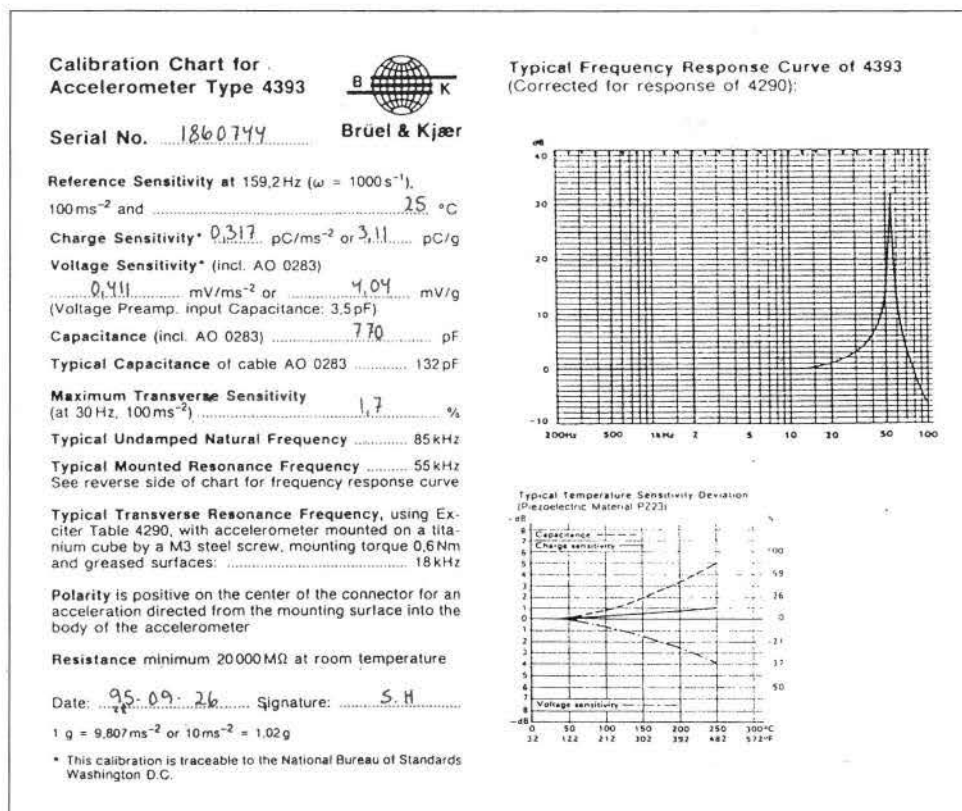


Fig. 3.16

3.2.2 AMPLIFICADOR

Los acelerómetros son dispositivos con una alta impedancia de salida y la instrumentación de medida suele tener una baja impedancia de entrada. Para acoplar estas dos impedancias se utiliza el amplificador.

3.2.2.1 Amplificador de carga.

El amplificador de carga da un voltaje de salida proporcional a la carga de entrada y, consecuentemente, a la aceleración. Este dispositivo amplifica la señal eléctrica (no la carga) hasta valores que puedan ser adecuadamente tratados.

Con entrada de amplificador de carga se pueden usar cables largos desde el acelerómetro sin pérdida apreciable de sensibilidad.

Las características más importantes que debe cumplir un amplificador son:

- debe ser preciso
- debe tener un bajo nivel de ruido eléctrico para producir una distorsión mínima de la señal
- debe tener un amplio rango de frecuencias y respuesta lineal en el mismo.
- debe tener un amplio rango dinámico
- debe estar equipado con indicadores de sobrecarga.

3.2.3 FILTROS PASO ALTO Y PASO BAJO

Los sistemas de filtros paso alto y bajo limitan el rango de frecuencias del instrumento al rango de frecuencias de interés. Además, la disposición en la cadena de medición de un sistema de filtro paso alto reduce la posibilidad de interferencias con señales de bajas frecuencias no deseadas, mientras que un sistema de filtro paso bajo (Fig 3.9) evita las señales con altas frecuencias así como la resonancia del acelerómetro.

3.2.4 REDES DE PONDERACIÓN EN FRECUENCIA

La percepción de las vibración es un fenómeno complejo, que depende de la frecuencia y de la magnitud de la aceleración, no existiendo linealidad entre ambas variables. También debemos considerar la dirección de entrada de la vibración porque el cuerpo humano no es simétrico.

Cuando deseamos valorar los riesgos derivados de la exposición a la vibración de los trabajadores, tenemos que conseguir que la medida de la aceleración sea, de algún modo, reflejo de la forma en que el trabajador percibe la vibración.

Para ello, lo que se hace es ponderar en frecuencia la vibración recibida utilizando un filtro que se intercala en la cadena de medición. Básicamente es un filtro que tiene como función atenuar los niveles de aceleración en función de la frecuencia.

De acuerdo con la norma UNE ENV 28041 (ISO 8041:1990)², la instrumentación de medida de la respuesta humana a las vibraciones debe tener una o más de las características de ponderación en frecuencia designadas en la Tabla 1, aunque también se pueden incluir otras características opcionales de ponderación.

TABLA 1

Característica de la vibración	Rango de frecuencia (Hz)	Norma Internacional
Cuerpo completo, severo discomfort, z: denominada C.C.S.D.z	0,1 a 1	ISO 2631-1
Cuerpo completo, x-y: denominada C.C.x-y	1 a 80	ISO 2631-1
Cuerpo completo, z: denominada C.C.z	1 a 80	ISO 2631-1
Cuerpo completo, combinado: denominada C.C.combinada	1 a 80	ISO 2631-2
Mano-brazo: denominada M-B	8 a 1.000	ISO 2631-1

Los factores de ponderación frecuencial para la medida de la vibración mano-brazo y del cuerpo completo están definidos en las Normas UNE ENV 25349 (ISO 5349) e ISO 2631, respectivamente.

Para la medida de la vibración mano-brazo, los factores de ponderación frecuencial son los mismos para los tres ejes de coordenadas (x, y, z).

Para la medida de la vibración cuerpo completo, se distinguen los factores de ponderación frecuencial para los ejes x e y y para el eje z.

En las Tablas 2 y 3 se indican cuáles son los factores de ponderación K_j (o ganancia) en función de la frecuencia central para cada banda de tercio de octava tanto para la vibración mano-brazo como para la vibración cuerpo completo. Y en las Fig 3.17 y 3.18 se representan los filtros utilizados para este fin.

También existe la posibilidad en el integrador de disponer de una característica opcional de ponderación designada como LINEAL. En definitiva, la señal de entrada no se pondera.

² Actualmente en proceso de revisión. La revisión comprende una modificación en las características de los filtros. Véase 5.1.1.7

TABLA 2: Ponderación en frecuencia: mano-brazo, basado en la Norma UNE ENV 25349 (ISO 5349).

Frecuencia (Hz)	Factor de ponderación K_j
6,3	1
8	1
10	1
12,5	1
16	1
20	0,8
25	0,63
31,5	0,5
40	0,4
50	0,3
63	0,25
80	0,2
100	0,16
125	0,125
160	0,1
200	0,08
250	0,063
315	0,05
400	0,04
500	0,03
630	0,025
800	0,02
1000	0,016
1250	0,0125

TABLA 3: Ponderación en frecuencia: cuerpo completo, basado en la Norma ISO 2631.

Frecuencia (Hz)	Factor de ponderación K_j para vibraciones longitudinales (a_z)	Factor de ponderación K_j para vibraciones transversales (a_{xy})
1,0	0,50	1
1,25	0,56	1
1,6	0,63	1
2,0	0,71	1
2,5	0,80	0,8
3,15	0,90	0,63
4,0	1	0,5
5,0	1	0,4
6,3	1	0,315
8,0	1	0,25
10,0	0,8	0,2
12,5	0,63	0,16
16,0	0,50	0,125
20,0	0,40	0,1
25,0	0,315	0,08
31,5	0,25	0,063
40,0	0,20	0,05
50,0	0,16	0,04
63,0	0,125	0,0315
80,0	0,10	0,025

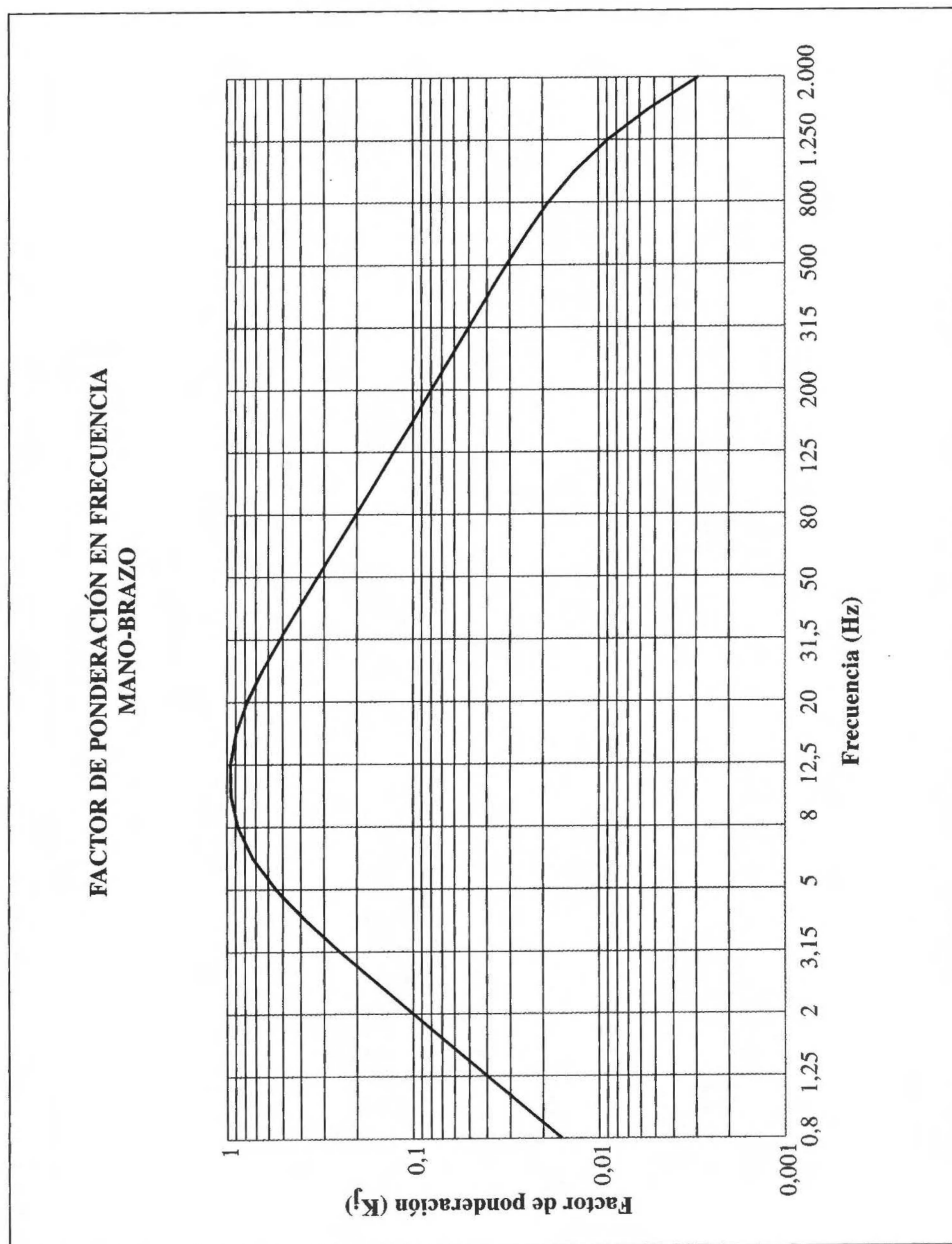


Fig. 3.17

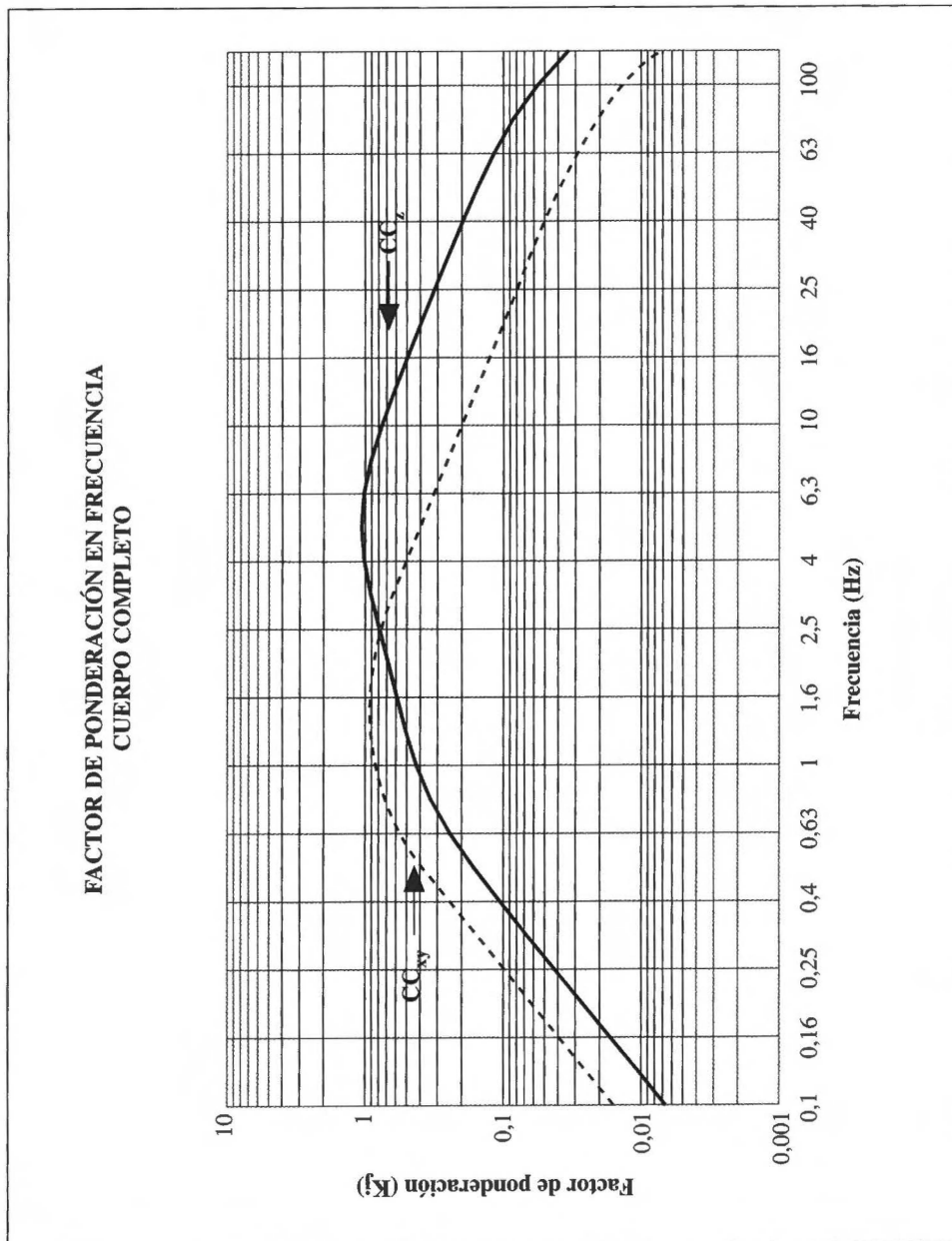


Fig. 3.18

3.2.5 FILTROS DE OCTAVA Y TERCIO DE OCTAVA

El vibrómetro da un único nivel de vibración medido para todo el rango de frecuencias de interés. A veces puede ser interesante conocer los niveles de vibración para cada una de las frecuencias singulares que integran la señal de vibración.

En la práctica lo que se hace es dividir el espectro de frecuencia de interés en bandas de octava y de tercio de octava, siendo necesario conectar al vibrómetro un filtro exterior de paso de banda para poder hacer, posteriormente, un análisis de frecuencia. Este filtro deja pasar sólo aquellas partes de la señal de vibración que están contenidas en una banda estrecha de frecuencias.

La selectividad del filtro, es decir, la estrechez de una banda pasante determina la resolución del análisis en frecuencia obtenido. En vibraciones la mejor resolución en todo el rango de frecuencia se consigue realizando un análisis del espectro en bandas de tercio de octava.

Si conocemos el espectro en bandas de octava y de tercio de octava de una señal de vibración, podemos calcular el nivel de aceleración ponderada, simplemente multiplicando el factor de ponderación por el valor de la aceleración en esa banda de frecuencia (o bien sumando la ganancia en dB).

3.2.5.1 Filtro paso banda.

Se define ganancia de un filtro paso banda al cociente entre la tensión de salida y la tensión de entrada. (Fig 3.19A)

Un filtro paso banda es un filtro ideal (Fig 3.19B) que deja pasar todas las frecuencias contenidas en su banda pasante y eliminaría completamente las restantes:

- Constante e igual a uno ($G = 1$; $G \text{ (dB)} = 0$) para las frecuencias en la banda de ancho $B = f_2 - f_1$
- Cero ($G = 0$; $G \text{ (dB)} = -\infty$) para las restantes frecuencias.

En la práctica es imposible conseguir un filtro con una caída tan brusca en las frecuencias f_1 y f_2 . En realidad, los filtros electrónicos reales presentan curvas de res-

puesta inclinadas, por lo cual no eliminan del todo las componentes exteriores a su banda y atenúan la potencia de la señal.

Para los filtros reales, el ancho de banda “B” se define como las diferencias entre las frecuencias f_2 y f_1 en las cuales la ganancia es $G \text{ (dB)} = -3 \text{ dB}$. (Fig 3.19C)

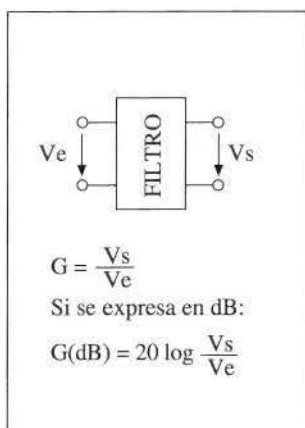


Fig. 3.19 A

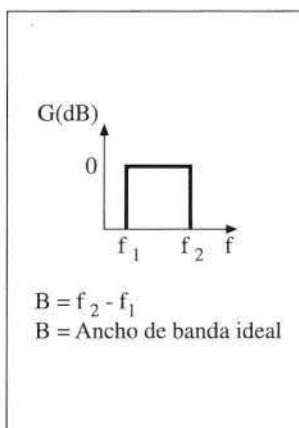


Fig. 3.19 B

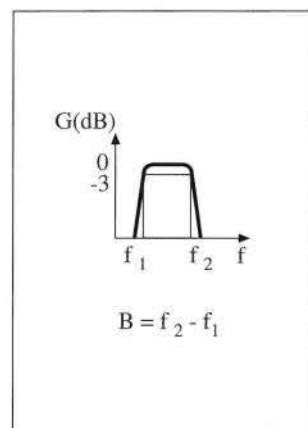


Fig. 3.19 C

Evidentemente la calidad de un filtro viene dada por su aproximación al filtro ideal.

Los filtros de octava y de tercio de octava son filtros paso banda cuyas características y tolerancias están definidas en la Norma UNE ENV 28041:1994 (ISO 8041:1990)³.

3.2.6 PROMEDIADO EN TIEMPO DE LA SEÑAL. RECTIFICADOR. CIRCUITO RMS

En un vibrómetro, la señal, una vez ponderada en frecuencia y amplificada, se eleva al cuadrado para obtener el valor eficaz.

En teoría, después de obtener el valor eficaz, podríamos alimentar a un indicador que nos daría el valor de la señal.

³ Actualmente en proceso de revisión.

En la práctica ese proceso es inviable ya que, debido a las rápidas variaciones de la vibración, las oscilaciones del indicador serían tan fuertes que sería imposible su lectura. Este problema se presenta siempre que se quiere, medir en un indicador magnitudes que varían rápidamente en el tiempo.

Para poder leer el indicador, se introduce en la cadena de medición un **promediador de tiempo exponencial**.

Un promediador de tiempo exponencial (Fig 3.20) es una red RC que responde exponencialmente cuando en su entrada se aplica una señal escalón. Debido a que la respuesta exponencial sólo alcanza su valor máximo en un tiempo infinito, el promediador se caracteriza por el tiempo que tarda en alcanzar el 63 % del valor máximo ($t = \tau$ (Constante de tiempo del promediador)).

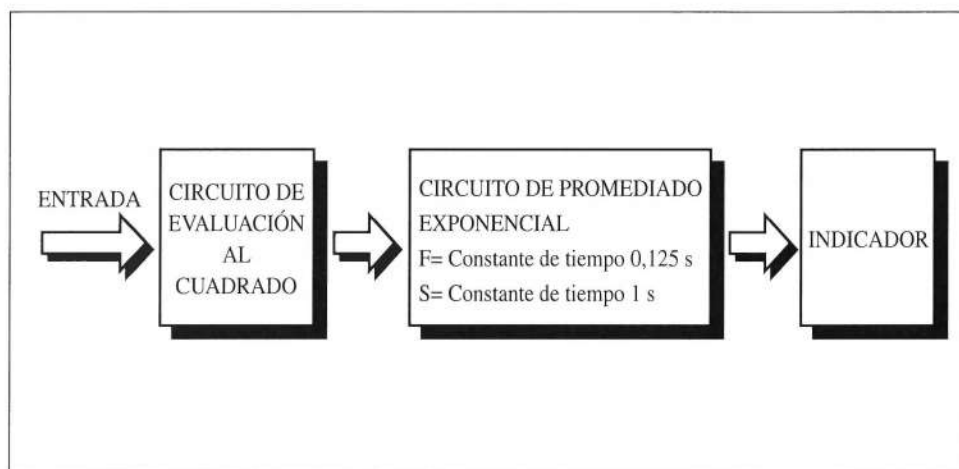


Fig. 3.20

La instrumentación para la medida de la respuesta humana a las vibraciones debe tener una constante de promediación exponencial en el tiempo de 1 s (SLOW), y si se incluye otra constante de tiempo adicional, tradicionalmente es de 0,125 (FAST).

En definitiva son distintas velocidades de seguimiento de las vibraciones:

- Escala SLOW (lenta) permite el seguimiento y lectura correcta del nivel de vibración cuando es muy fluctuante.

- Escala FAST (rápida) permite seguir las fluctuaciones del nivel de vibración, si bien se caracteriza por la inestabilidad y los constantes cambios de la aguja o números en caso de lectura digital.

No se conoce con certeza por qué son estas constantes y no otras las utilizadas. Parece más racional pensar que las constantes fueron elegidas por los fabricantes de instrumentos para tener una lectura “confortable” de acuerdo con la tecnología disponible en aquella época.

En el caso de que sea suministrada, la característica pico permite a la instrumentación de medida de las vibraciones indicar el máximo valor absoluto instantáneo de la señal de vibración. Esto es muy útil al medir choques mecánicos y vibraciones de corta duración (transitorias).

3.2.7 INDICADOR

Trás la conversión de lineal a logarítmica, la señal se presenta en el indicador en escala logarítmica.

El indicador es la parte del instrumento en la que obtenemos el valor numérico de la medida efectuada, expresado en metros por segundo al cuadrado y como nivel en decibelios, según las ponderaciones en tiempo y en frecuencia utilizadas.

Actualmente, debido al gran auge de la electrónica digital, los indicadores son prácticamente todos de tipo digital.

Un indicador digital debe visualizar al menos los valores instantáneos en el modo de ponderación en el tiempo. En general, los indicadores actualizan el valor cada segundo permitiendo de este modo una lectura cómoda. Los indicadores pueden estar dotados de circuitos de retención del valor máximo, del valor mínimo, etc.

En el indicador se debe tener la posibilidad de visualizar si ha habido sobrecarga que pueda causar lecturas erróneas, es decir, si en algún momento se ha excedido la capacidad para la medida de valor pico.

3.2.8 ANÁLISIS MÁS DETALLADO DE LA SEÑAL DE VIBRACIÓN

Una vez amplificada la señal, el vibrómetro mediante salida AC puede enviar los datos a un registrador gráfico.

A través de un convertidor A/D, también la señal se puede digitalizar y estudiar los datos en un analizador de tiempo real, o bien mediante interfaz se pueden volcar los datos a un ordenador para trabajar con ellos en una hoja de cálculo, un programa estadístico, etc.

Además del vibrómetro, en los estudios de vibraciones se usan con bastante frecuencia los registradores de cinta para grabar in situ la señal y luego analizarla con más detalle en el laboratorio por medio del analizador en tiempo real. En la pantalla del analizador en tiempo real se presenta un gran número de bandas de frecuencia consecutivas que se valoran casi instantáneamente. Los analizadores en tiempo real suelen tener salida digital.

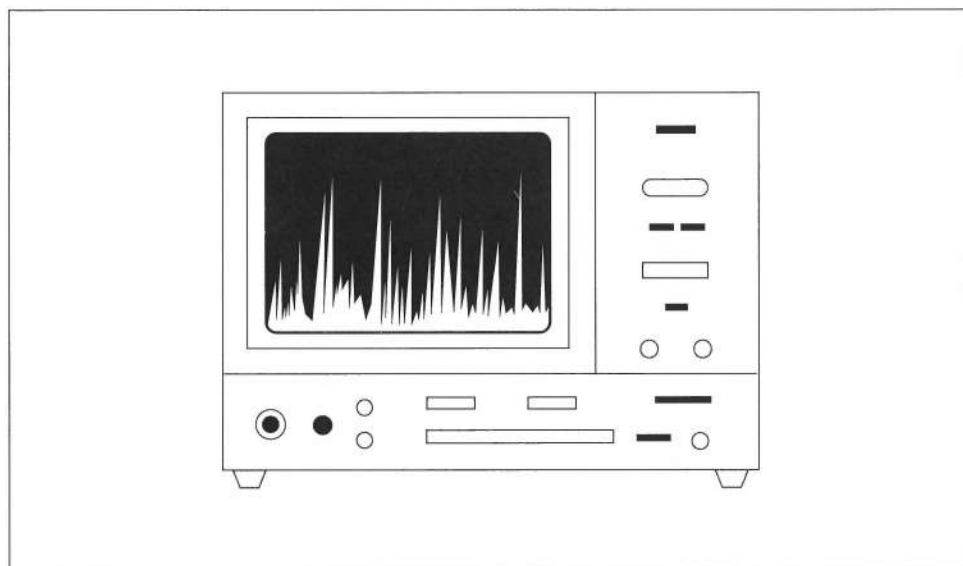


Fig. 3.21

Actualmente, se están fabricando analizadores en tiempo real portátiles de modo que no es necesario la grabación de la señal en el registrador porque se puede analizar en la empresa.

3.2.9 NORMAS DE CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE EQUIPOS DE MEDIDA

El equipo de medida debe ser construido y calibrado de acuerdo con normas establecidas, por ejemplo la UNE ENV 28041 “Respuesta humana a las vibraciones. Instrumentos de medida” (ISO 8041: 1990)⁴.

⁴ Actualmente en proceso de revisión.

CAPÍTULO 4

VIBRACIONES MANO-BRAZO

4.0 INTRODUCCIÓN

Las vibraciones mecánicas procedentes de herramientas o procesos motorizados que entran en el cuerpo a través de las manos se denominan vibraciones transmitidas a la mano o vibraciones mano-brazo (VMB).

En el ámbito laboral, los procesos y herramientas mecánicos que exponen las manos del trabajador a las VMB están ampliamente extendidos, como puede verse en los siguientes ejemplos:

- en fundiciones e industria del metal: buriladores, amoladoras de todo tipo, pulidoras, remachadoras, llaves de impacto, martillos de agujas.
- en minería y construcción: martillos rompedores, compactadores, taladros percutores, buriladores, compactadores vibratorios.
- en agricultura y explotaciones forestales: segadoras manuales, sierras de cadena, sierras de recortar, máquinas descortezadoras, clavadoras.

También los trabajadores pueden estar expuestos a las VMB a través de las piezas de trabajo que vibran y de los controles vibratorios que sujetan con sus manos.

En el momento actual, las autoridades de diferentes países han estimado que del 1,7 al 3,6 % de los trabajadores de los países europeos y de Estados Unidos están expuestos a VMB potencialmente perjudiciales.

La utilización habitual y prolongada de máquinas que transmiten vibraciones a las manos pueden ser origen de una serie de efectos sobre los miembros superiores del trabajador.

4.1 EFECTOS DE LA EXPOSICIÓN A VIBRACIÓN MANO-BRAZO

La exposición de dedos, manos y brazos a dichas vibraciones se asocia a una serie de trastornos. El término “SÍNDROME DE LA VIBRACIÓN MANO-BRAZO” se refiere a un grupo de signos y síntomas que pueden ser catalogados en cuatro tipos: trastornos vasculares, neurológicos, musculoesqueléticos y otros trastornos.

A continuación se describe brevemente cómo se manifiestan cada uno de los trastornos que puede ocasionar la exposición a VMB.

Trastornos vasculares

Los trastornos vasculares incluyen cualquier alteración circulatoria que a menudo se identifica con palidez intermitente de los dedos. Este trastorno implica un cierre espástico temporal de la circulación sanguínea a los dedos y se denomina fenómeno de Raynaud (este médico francés fue el primero que describió este fenómeno en 1862).

Se usan varios sinónimos para describir los trastornos vasculares inducidos por la vibración: dedo blanco (DB), fenómeno de Raynaud de origen profesional, enfermedad vasospástica traumática (EVT) y, más recientemente, DEDO BLANCO INDUCIDO POR VIBRACIONES (DBV).

En algunos países, el DBV se incluye en la lista de enfermedades profesionales y los trabajadores aquejados por DBV pueden tener derecho a indemnización.

Inicialmente, los ataques de palidez se presentan en la punta de uno o más dedos; pero, con una exposición continuada a la vibración, el adormecimiento se puede extender a la totalidad del área de los dedos en contacto con la fuente de vibración. En algunas personas el dedo puede desarrollar una cianosis permanente. En casos extremos, puede haber necrosis de la piel y muy excepcionalmente gangrena.

Los ataques de palidez son más comunes en invierno que en verano y duran desde unos pocos minutos a más de una hora. Si la exposición a la VMB es continua, los ataques de palidez pueden llegar a ser más frecuentes y pueden suceder durante todo el año.

La sensibilidad en los dedos disminuye durante el ataque de manera que pueden no ser detectados los estímulos que normalmente producen dolor (temperaturas extremas y traumatismos). La sensibilidad táctil y la destreza manual también pueden verse afectadas, de modo que la actividad laboral no se puede reanudar hasta que el ataque no haya finalizado.

El ataque de palidez finaliza cuando la circulación retorna gracias a un recalentamiento de los dedos por masaje local, apareciendo un enrojecimiento, eventual-

mente asociado con dolor, en los dedos afectados como consecuencia de un aumento reactivo del flujo sanguíneo en los vasos cutáneos.

El DBV aparece más frecuentemente entre usuarios de herramientas percutoras para el trabajo con metales, amoladoras y otras herramientas rotativas, martillos percutores y taladros usados en minería, sierras de cadena, etc.

Existen pruebas de que el uso de herramientas que tienen una vibración dominante en el rango de frecuencias de 25 a 250 Hz aproximadamente produce con más frecuencia DBV que las que la tienen fuera de este rango.

En general, los efectos de una vibración dependen de la dosis de vibración recibida que es función del tiempo de exposición y de la amplitud, frecuencia y dirección de la vibración. También el método de trabajo empleado influye de forma importante en cómo se transmiten las vibraciones al cuerpo. Las condiciones ambientales (temperatura, flujo de aire, humedad y ruido), características individuales (susceptibilidad, tabaco y algunos medicamentos que afectan a la circulación periférica), etc. ayudan al desarrollo del DBV.

La relación entre la exposición a VMB y los trastornos vasculares no se conoce completamente, pero hay evidencia de que el tiempo de exposición acumulado antes de la aparición del DBV es inversamente proporcional a la magnitud de la exposición a la vibración. Así, cuando la magnitud de la vibración se divide por la mitad, se duplica el tiempo en aparecer el DBV.

Trastornos neurológicos

Los trabajadores expuestos a vibraciones pueden presentar un aumento de los umbrales táctil y térmico, así como un empeoramiento de la destreza manual en el examen clínico. También se puede encontrar una reducción de la sensibilidad a la vibración en las puntas de los dedos por causas diferentes a las que desarrollan los ataques de DBV.

Los estudios epidemiológicos de trabajadores expuestos a vibraciones muestran que la pérdida sensorial afecta a usuarios de una amplia gama de tipos de herramientas y que puede presentarse con un amplio rango de frecuencias de vibración. Una disminución de la sensibilidad táctil ha sido descrita en dentistas por el uso de los taladros.

Algunas veces, los trabajadores expuestos muestran signos y síntomas de neuropatías por compresión, tal como el síndrome del túnel carpiano (STC), un trastorno debido a la compresión del nervio mediano a su paso por el túnel anatómico de la muñeca. El STC parece ser corriente en algunos grupos profesionales que utilizan herramientas vibratorias como perforadores, chapistas y trabajadores forestales. Se cree que los movimientos repetidos de la mano y la muñeca, tareas habituales que requieren el empleo de gran fuerza con la mano, tareas que precisan posiciones o movimientos forzados de la mano (hiperflexión o hiperextensión), realización de movimientos de pinza con los dedos de forma repetida, presión sobre la muñeca o sobre la palma de la mano frecuente o prolongadamente añadidos a la vibración pueden ser causa del STC en trabajadores que usan de forma regular y continuada herramientas de mano vibrátiles.

Trastornos musculoesqueléticos

Esqueléticos

Los trastornos del hueso y de las articulaciones inducidos por vibraciones son objeto de controversia. Varios autores consideran que este tipo de trastornos en trabajadores que usan herramientas vibrátiles son de carácter inespecífico y similares a las debidas al proceso de envejecimiento y al trabajo manual pesado. Por otra parte, algunos investigadores han señalado que pueden producirse una serie de cambios característicos del esqueleto en las manos, muñecas y codos derivados de una exposición prolongada a VMB.

Se ha observado una elevada prevalencia de artrosis de la muñeca y de artrosis y osteofitosis del codo en mineros, trabajadores de obras públicas y del metal expuestos a choques y vibraciones de baja frecuencia y gran amplitud debidos a herramientas neumáticas de percusión. Por el contrario, hay pocas pruebas de un aumento de prevalencia de los trastornos degenerativos de huesos y articulaciones en las extremidades superiores de trabajadores expuestos a vibraciones de frecuencias medias o altas derivadas de sierras de cadena o de esmeriladoras, por ejemplo.

La mayor presencia de trastornos del esqueleto en trabajadores que manejan herramientas percutoras puede ser explicada por el esfuerzo físico y el agarre con fuerza que realizan, además de la conjugación con otros factores biomecánicos.

Los signos y síntomas incluyen dolor local, hinchazón y rigidez en varias zonas de los miembros superiores que pueden estar asociados con degeneración de huesos y articulaciones.

En algunos países, los trastornos en huesos y articulaciones diagnosticados en trabajadores que usan herramientas vibratorias se consideran una enfermedad profesional.

Musculares

Los trabajadores expuestos a vibraciones pueden manifestar debilidad muscular y dolores en brazos y manos. También se ha asociado con una reducción de la fuerza de prensión como en el caso de usuarios de sierras de cadena. En algunos individuos la fatiga muscular es causa de incapacidad.

Se han sugerido lesiones mecánicas directas o daños en los nervios periféricos como posibles factores etiológicos de síntomas musculares. Y se han observado otros trastornos como tendinitis y tenosinovitis en las extremidades superiores y contractura de Dupuytren (enfermedad del tejido fascicular de la palma de la mano). Estos trastornos pueden estar asociados a factores como trabajo manual pesado, con lo que su relación con la VMB no es concluyente.

Otros trastornos

Algunos estudios indican que, entre los trabajadores afectados, la pérdida auditiva es mayor que la que cabría esperar en función de la edad y de la exposición al ruido debido al uso de herramientas vibratorias. Se ha observado que los individuos que padecen DBV pueden tener un riesgo adicional de pérdida auditiva debido a la vasoconstricción inducida por las vibraciones de los vasos sanguíneos que riegan el oído interno.

Además de los trastornos periféricos, se han observado otros signos y síntomas como fatiga persistente, dolor de cabeza, irritabilidad, trastornos del sueño, etc.

Los resultados de los estudios anteriormente mencionados deben interpretarse con precaución y se necesitan trabajos de investigación epidemiológica y clínica adicionales para confirmar la hipótesis de una asociación de estos trastornos con la exposición a VMB.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA VIBRACIÓN MANO-BRAZO

Cuando se desea caracterizar la VMB siempre se recurre a su frecuencia, dirección y amplitud. Ahora bien, la severidad de los efectos biológicos de la vibración sobre los miembros superiores de los trabajadores expuestos también depende de más factores especificados en la Tabla 1.

Así, por ejemplo, cuanto mayor es la fuerza de prensión de la mano, mayor es la energía transmitida al sistema mano-brazo.

Actualmente, se consideran necesarios un mayor número de estudios que permitan conocer con más detalle la importancia de muchos de estos factores.

TABLA 1

Características de la vibración:
* Dirección de la vibración
* Espectro en frecuencia de la vibración
* Amplitud de la vibración
Condiciones de exposición:
* Tiempo de exposición diario
* Variación de la exposición con el tiempo (continua, intermitente, períodos de descanso)
* Exposición acumulada anterior
Herramientas o procesos:
* Diseño de la herramienta (portátil, fija)
* Tipo de herramienta (percutora, rotativa, etc.)
* Estado de la máquina vibratoria
* Material trabajado
Características individuales:
* Método de trabajo (fuerza de prensión o de agarre, fuerza de empuje, postura de las manos, los brazos y el cuerpo)
* Intensidad y dirección de las fuerzas aplicadas por el trabajador, mediante las manos, para mantener la herramienta o la pieza
* Área y localización de las partes de la mano expuestas a la vibración
* Formación del trabajador
* Factores predisponibles en la salud del individuo
Condiciones ambientales:
* Temperatura ambiente
* Flujo de aire
* Ruido
* Humedad

4.2.1 DIRECCIÓN DE LA VIBRACIÓN

La respuesta dinámica del sistema mano-brazo difiere para distintas direcciones del movimiento. Por ello, las vibraciones transmitidas a la mano deben definirse según las direcciones adecuadas (x , y , z) de un sistema de coordenadas ortogonal.

El sistema de coordenadas BASICÉNTRICO puede ser adecuado para la medida de las VMB (Fig. 4.1). Este sistema basicéntrico sitúa el origen de coordenadas en la superficie de la empuñadura de la herramienta, de la pieza de trabajo o instrumentos de control manual vibrantes.

El sistema de coordenadas basicéntrico se define para la posición de “empuñadura” (Fig. 4.1a) y para la posición de “palma abierta” (Fig. 4.1b).

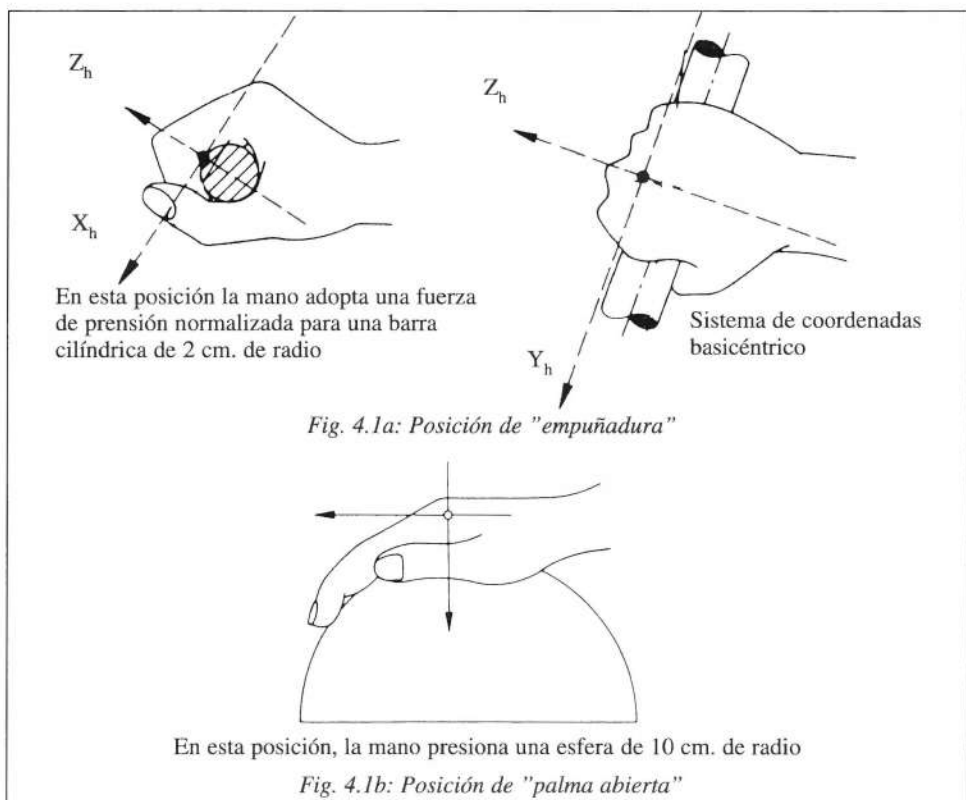


Fig. 4.1: Sistema de coordenadas basicéntrico para la medida de vibraciones mano-brazo

Para evitar conflictos con la terminología propuesta en la vibración de cuerpo completo, los movimientos de la mano en las diversas direcciones del sistema de coordenadas serán designados por la palabra “**mano**” entre paréntesis o por la letra **h** (de hand, mano en denominación inglesa) para indicar que estamos refiriéndonos a la aceleración del sistema mano brazo.

Para el sistema de coordenadas, se determina la aceleración en los tres ejes: $\mathbf{a}_{x,h}$ o $\mathbf{a}_{x(\text{mano})}$; $\mathbf{a}_{y,h}$ o $\mathbf{a}_{y(\text{mano})}$; $\mathbf{a}_{z,h}$ o $\mathbf{a}_{z(\text{mano})}$.

4.2.2 AMPLITUD DE LA VIBRACIÓN

Hay dos posibilidades para describir la amplitud de la vibración, en términos de:

Aceleración

Es la magnitud primaria para describir la amplitud de la vibración. Normalmente, se expresa como **valor eficaz de la aceleración, rms**, en metros por segundo al cuadrado (**m/s²**).

También la aceleración se puede expresar como **aceleración ponderada en frecuencia** cuando se mide a través de un filtro con unas características de ponderación conforme con la norma UNE ENV 28041 (Tabla 2). En este caso, se utiliza el subíndice **w** (de *weighting*, ponderado en denominación inglesa) para indicar que estamos refiriéndonos a la aceleración ponderada en frecuencia del sistema mano-brazo. Para cada uno de los tres ejes del sistema de coordenadas se representa como $\mathbf{a}_{x,h,w}$, $\mathbf{a}_{y,h,w}$ y $\mathbf{a}_{z,h,w}$.

Las aceleraciones medidas en conjunción con equipos de análisis en frecuencia (por ejemplo, filtros de banda de frecuencia de tercios de octava) no deben ser ponderadas.

Nivel de aceleración

Se expresa en decibelios (**dB**) mediante la ecuación:

$$L_h = 20 \log \frac{a}{a_0} \quad (4.1)$$

Siendo:

a = Aceleración rms en m/s²

a_0 = Aceleración de referencia = 10⁻⁶ m/s² = 1 μm/s²

Cuando el nivel de aceleración se mide a través del filtro de ponderación de frecuencia referido anteriormente (Tabla 2), se denomina **nivel de aceleración ponderada**.

$$L_{h,w} = 20 \log \frac{a_w}{a_0} \quad (4.2)$$

Siendo:

a_w = Aceleración rms ponderada en frecuencia en m/s^2

Los niveles de aceleración medidos en conjunción con equipos de análisis en frecuencia (por ejemplo, filtros de banda de frecuencia de tercios de octava) no deben ponderarse.

Tabla 2: Filtro de ponderación de frecuencia para la medida de vibración mano-brazo

Frecuencia (Hz)	Ganancia nominal (dB)
6,3	0
8	0
10	0
12,5	0
16	0
20	-2
25	-4
31,5	-6
40	-8
50	-10
63	-12
80	-14
100	-16
125	-18
160	-20
200	-22
250	-24
315	-26
400	-28
500	-30
630	-32
800	-34
1000	-36
1250	-38

4.3 MEDIDA Y EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LA VIBRACIÓN MANO-BRAZO

La Norma Europea UNE ENV 25349:1992 “**Vibraciones mecánicas. Directrices para la medida y evaluación de la exposición humana a la vibraciones transmitidas por la mano**” (ISO 5349:1986)⁵ especifica métodos generales para la medida y la representación en tres ejes ortogonales de la exposición a vibraciones transmitidas por la mano para las bandas de tercios de octava con frecuencias centrales comprendidas entre los 6,3 Hz y los 1250 Hz, las bandas de octava con frecuencias centrales entre 8 Hz y 1000 Hz y una medida ponderada en frecuencias que cubre la banda de frecuencias que va de 5,6 Hz a 1400 Hz.

Esta Norma, junto con sus anexos, proporciona una guía de evaluación de la exposición a VMB mediante la aceleración ponderada en frecuencia y el tiempo diario de exposición. No define límites admisibles de exposición.

4.3.1 MEDIDA DE LA VIBRACIÓN MANO-BRAZO

4.3.1.1 Equipo de medida de la vibración mano-brazo.

Las características básicas del equipo de medida de las vibraciones han sido recogidas en el Capítulo 3.

Sin embargo, es interesante señalar que el equipo de medida debe ser construido y calibrado correctamente, de acuerdo con normas establecidas, por ejemplo UNE ENV 28041:1994 “Respuesta humana a las vibraciones. Instrumentos de medida” (ISO 8041: 1990)⁶.

Junto con los resultados de la medida hay que dar las características básicas de los equipos de medida como respuesta en frecuencia, propiedades dinámicas (por ejemplo: constante de tiempo, rango dinámico y resolución del equipo), etc.

⁵ Actualmente en proceso de revisión.

⁶ Actualmente en proceso de revisión.

El equipo completo de medida debe tener el rango dinámico más amplio posible dentro del rango de frecuencia de interés. Si es necesario atenuar señales por encima de 2000 Hz, se tiene que realizar la atenuación lo más cerca posible del acelerómetro dentro de la cadena de medida.

La respuesta en frecuencia del acelerómetro debe ser adecuada para el rango de frecuencia comprendido entre 5 y 1500 Hz, suficiente para cubrir las bandas de octava con frecuencias centrales de 8 a 1000 Hz. El transductor debe ser lo más pequeño y ligero posible.

4.3.1.2 Medida del valor eficaz.

Si la señal que se ha de analizar es de una duración muy corta o si su amplitud varía sustancialmente con el tiempo, no puede hacerse un análisis simple. En estos casos, para cada dirección que se mida se recomienda utilizar un equipo integrador que disponga preferentemente de integración lineal.

Sólo cuando la señal sea relativamente estable en el tiempo o de una duración suficiente, la constante de tiempo elegida debe ser adecuada a la duración de la señal.

4.3.1.3 Colocación y montaje de los acelerómetros.

Las medidas en los tres ejes ortogonales deben hacerse sobre las zonas de la superficie de la(s) mano(s) o en las áreas por donde entra la energía vibratoria al cuerpo, o en zonas claramente relacionadas con las anteriores. De modo que los acelerómetros indiquen la vibración en la interfaz de la mano y la fuente de vibración.

Cuando sea apropiado, se deben considerar por separado las manos derecha e izquierda.

Si la mano está en contacto directo con la superficie vibrante de la empuñadura, el acelerómetro debería ir fijado a la estructura vibrátil.

Si la amplitud de la vibración varía significativamente en distintas partes de la empuñadura, se debe registrar el valor máximo en cualquier punto que esté en contacto con la mano. Por ello, es importante determinar dónde se alcanza el valor máximo de vibración.

Si existe un elemento resiliente entre la mano y la estructura vibrante (por ejemplo, una empuñadura amortiguadora) se puede utilizar un soporte para montar el acelerómetro y colocarlo entre la mano y la superficie del material resiliente (por ejemplo, una lámina de metal con forma adecuada). En cualquier caso, se deberá tener cuidado de que la masa, el tamaño, la forma y el montaje del acelerómetro o de su soporte no influyan significativamente en la transmisión de la vibración a la mano dentro del intervalo de frecuencias pertinente.

El acelerómetro es sensible a la aceleración a lo largo de un solo eje. Existen dispositivos para montaje de los acelerómetros que facilitan la medida de la vibración en los tres ejes ortogonales de forma simultánea y permiten situar los acelerómetros tan juntos como sea posible. (Fig. 4.2).

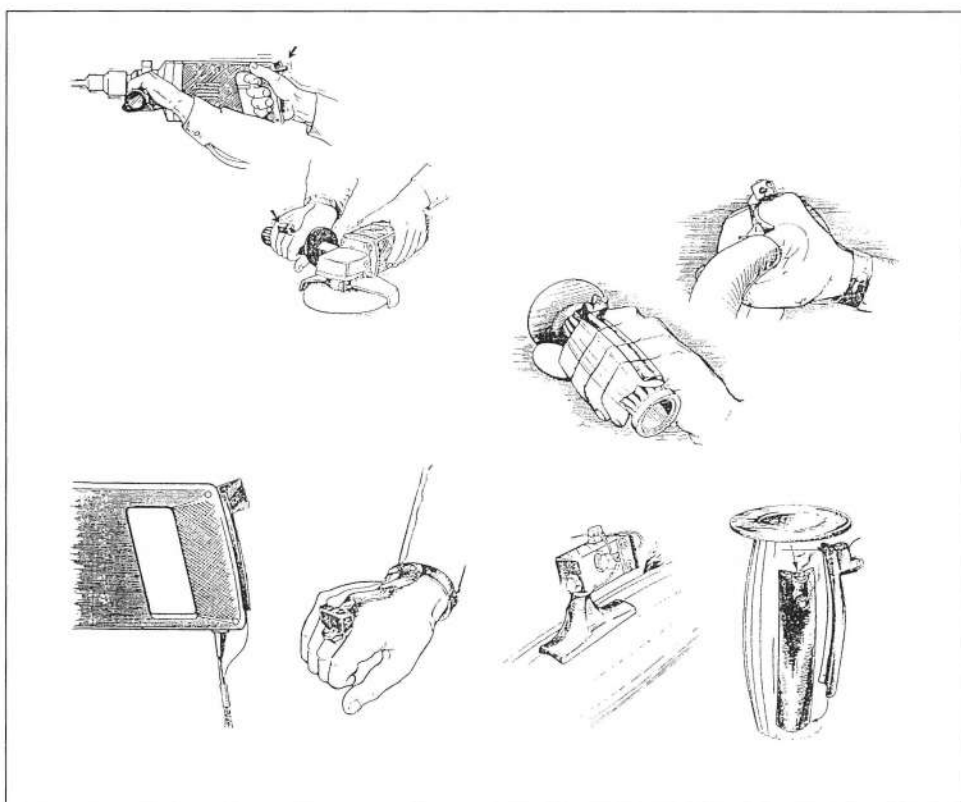


Fig. 4.2: Dispositivos para montaje de acelerómetros de Brüel & Kjaer

La localización del eje de coordenadas y la posición de montaje de los acelerómetros (Fig. 4.3), pueden obtenerse en el grupo de normas de medida de vibraciones en máquinas (Códigos de ensayo de vibraciones), algunas de las cuales se indican en el Capítulo 6.

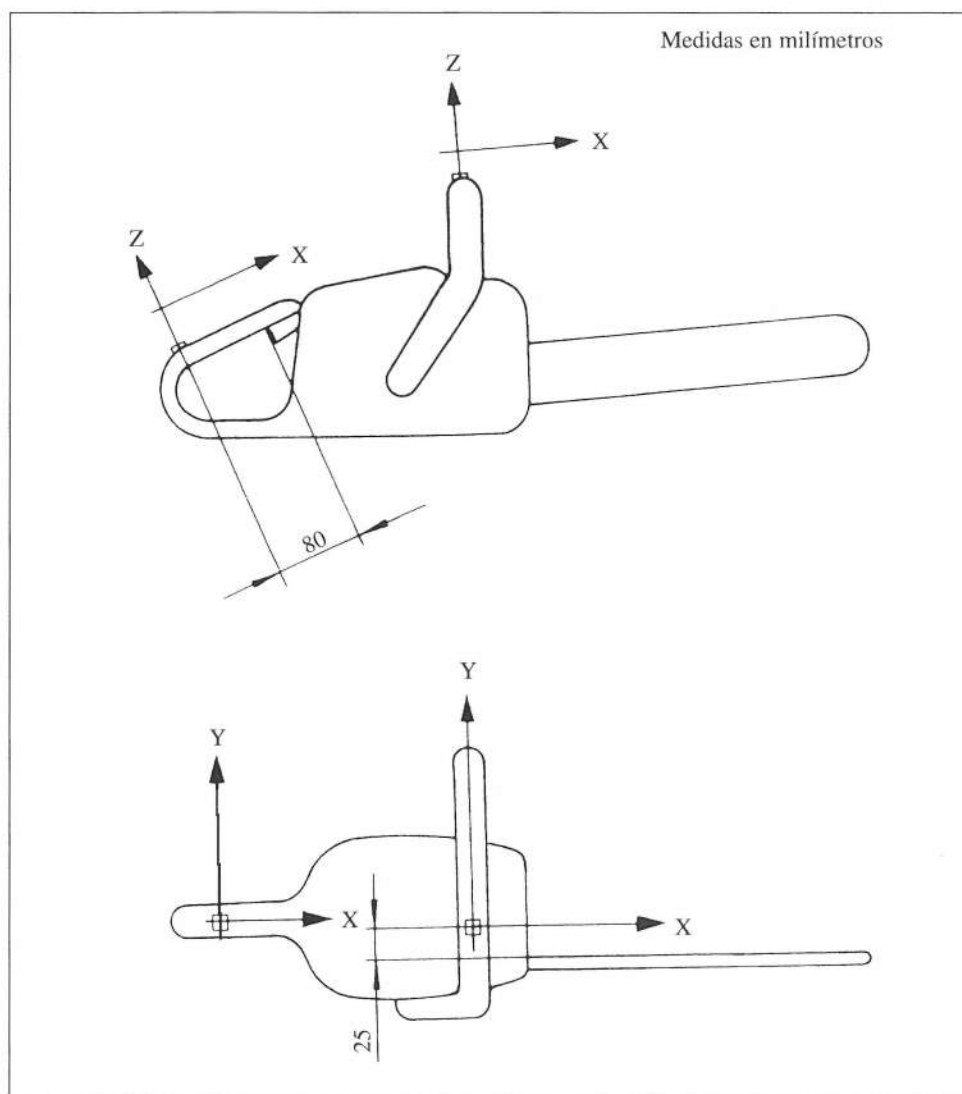


Fig. 4.3: Ejemplo localización de los ejes de coordenadas y colocación de acelerómetros en sierras de cadena, según ISO 7505:1986

Cuando se miden aceleraciones con picos muy elevados, por ejemplo las que se obtienen en las herramientas percutoras, deben tomarse una serie de precauciones para evitar la sobrecarga en cualquier parte del sistema de medida:

- El acelerómetro debe ser capaz de trabajar dentro del rango de la vibración medida, debe ofrecer buena estabilidad y ser de tamaño pequeño.
- Debe tener la frecuencia de resonancia por encima de los 25 kHz.
- Un método adecuado de medida es colocar, entre el acelerómetro y la fuente de vibración, un filtro mecánico, de paso bajo, que tenga una función de transferencia lineal convenientemente calibrado. Mediante este método se reducen los picos causados por los componentes de alta frecuencia de la señal (>3000 Hz). En la Fig. 4.4 se muestra un ejemplo de colocación de un filtro mecánico en la medida de vibraciones en las empuñaduras de martillos perforadores y martillos rotativos, según UNE EN 28662-3:1996 (ISO 8662-3: 1992).

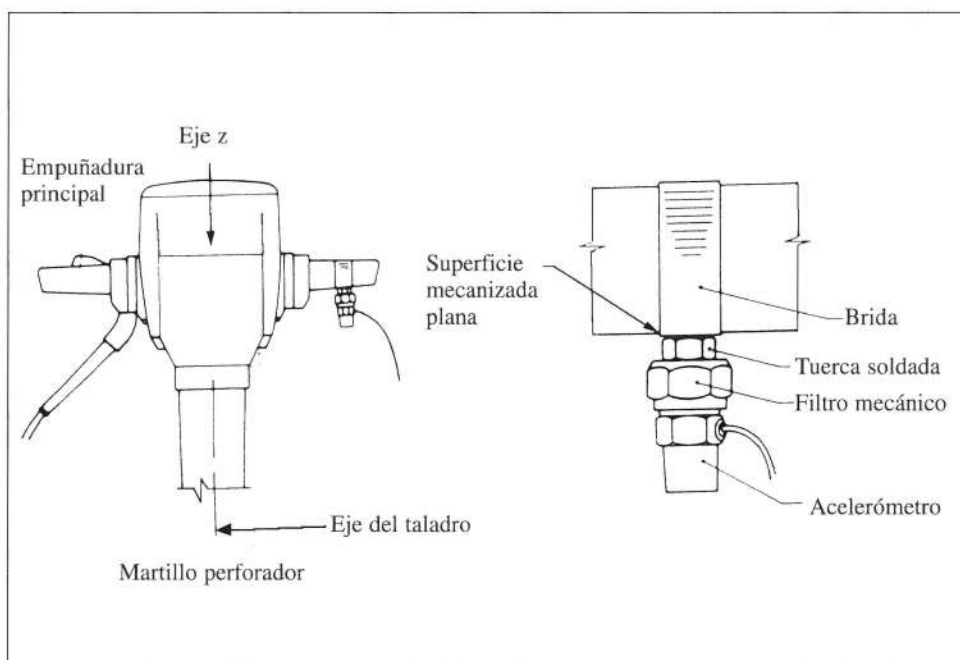


Fig. 4.4: Ejemplo de colocación de un filtro mecánico en la medida de vibraciones en las empuñaduras de martillos perforadores según UNE EN 28662-3:1996

Si existe un elemento resiliente entre la mano y la estructura vibrante, el método propuesto no es satisfactorio para todas las condiciones, particularmente en el caso de un material resiliente fino que afecta, principalmente, a la transferencia de las frecuencias más altas. En tales situaciones, podría ser preferible hacer las medidas con el acelerómetro fijado rígidamente a la estructura y anotar por separado las características del material resiliente: tipo, espesor, propiedades físicas y amortiguamiento estimado.

4.3.1.4 Magnitudes que deben ser medidas.

La aceleración medida en uno o varios ejes ($a_{i(i=x,y,z)}$) puede expresarse como:

$a_{i,h,w(i=x,y,z)}$: Aceleración ponderada en frecuencia, mediante la utilización del filtro de ponderación de frecuencia, cuyas características se indican en la norma UNE ENV 28041.

$a_{i,j}$: Aceleración en bandas de octava o tercios de octava. Principalmente, se recomienda hacer el análisis en bandas de tercios de octava para cada componente de aceleración.

4.3.1.5 Duración de la medida.

La duración de la medida debe ser suficiente para que sea representativa de la exposición a la vibración.

Si la exposición a la vibración se compone de diferentes períodos con distintos tipos de tareas, se debe hacer la medida durante un tiempo suficiente que asegure la representatividad de la medida de la vibración que se está evaluando.

De forma frecuente, la exposición a la vibración se caracteriza por ciclos cortos pero repetidos durante una jornada de trabajo. La medida debe promediarse sobre un período que sea representativo del uso normal de la herramienta o proceso. Cuando sea posible, el período de medida debe comenzar cuando las manos del operador tomen contacto con la superficie vibrante y terminar cuando cese el contacto. Este período puede incluir variaciones en la magnitud de la vibración.

Idealmente las medidas deben promediarse en un período de varios minutos de exposición. Será preciso repetir las medidas varias veces para confirmar los resultados.

Las medidas que duren menos de 15 segundos serán muy imprecisas si se pretende valorar componentes de bajas frecuencias.

4.3.1.6 Acoplamiento de la mano a la fuente vibratoria.

Para el propósito de esta Norma, la exposición a la vibración debe caracterizarse para una presión de la mano y una fuerza estática representativas del acoplamiento de la mano a la fuente vibratoria cuando el trabajador realiza la tarea.

En la actualidad, ISO ha admitido una nueva proposición para elaborar una norma (ISO NP 15260 “Vibración mecánica: Medida de la fuerzas de agarre y de empuje”) ya que, cuando dicho acoplamiento se modifica, también varía la energía transmitida al cuerpo y, por tanto, la exposición a la aceleración medida se afecta considerablemente.

4.4 EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LA VIBRACIÓN MANO-BRAZO

4.4.1 EXPOSICIÓN DIARIA

La evaluación de la exposición a la vibración se basa en la exposición diaria, es decir, la magnitud promedio de la vibración a la que está expuesto el trabajador durante su jornada de trabajo.

Con el fin de permitir comparaciones entre diferentes tiempos de exposición, la exposición diaria se expresa mediante la **aceleración continua equivalente ponderada en frecuencia para un período de 4 h**, $(a_{h,w})_{eq(4)}$.

Si el tiempo de exposición es distinto a 4h, la aceleración continua equivalente ponderada en frecuencia, para un período de 4 horas, puede hallarse por la expresión:

$$(a_{h,w})_{eq(4)} = \left(\frac{1}{T_4} \int_0^{\tau} (a_{h,w}(t))^2 dt \right)^{1/2} \quad (4.3)$$

Donde:

$(a_{h,w})_{eq(4)}$: Aceleración continua equivalente ponderada en frecuencia para un período de 4 horas.

$a_{h,w}(t)$: Valor instantáneo de la aceleración ponderada en frecuencia.

τ : Duración total de la jornada de trabajo en horas.

T_4 : 4 horas.

Es importante resaltar que, para la norma UNE ENV 25349, el período base para la evaluación de la exposición diaria es de 4 horas, aunque también podrían utilizarse otros períodos de tiempo, por ejemplo 8 horas en el caso de la propuesta de Directiva de Agentes Físicos (véase apartado 4.6), siendo necesario adecuar matemáticamente las ecuaciones.

4.4.1.1 Cálculo de la aceleración continua equivalente para un período de 4 horas, cuando se conoce la aceleración continua equivalente para un período distinto de 4 h.

Se determina por la expresión:

$$(a_{h,w})_{eq(4)} = (a_{h,w})_{eq(T)} \left(\frac{T}{4} \right)^{1/2} \quad (4.4)$$

Donde:

$(a_{h,w})_{eq(T)}$: Aceleración continua equivalente ponderada en frecuencia para un período de T horas.

Ejemplo:

Un trabajador está expuesto a una $(a_{h,w})_{eq(6)} = 10 \text{ m/s}^2$. Determinar la $(a_{h,w})_{eq(4)}$.

$$(a_{h,w})_{eq(4)} = 10 \cdot (6/4)^{1/2} = 12,25 \text{ m/s}^2$$

4.4.1.2 Cálculo de la aceleración continua equivalente total ponderada en frecuencia si la exposición diaria total comprende varias exposiciones de diferentes amplitudes y duraciones.

Se puede calcular mediante la ecuación:

$$(a_{h,w})_{eq(T)} = \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^{i=n} ((a_{h,w})_{eq(ti)})^2 ti \right)^{1/2} \quad (4.5)$$

Donde:

$$T = \sum_{i=1}^{i=n} t_i \quad (4.6)$$

Siendo:

$(a_{h,w})_{eq(ti)}$: Aceleración continua equivalente ponderada en frecuencia para la i-ésima componente de una exposición con duración t_i , en horas.

T: Duración total de todas las exposiciones.

Ejemplo:

Un trabajador está expuesto a los siguientes valores de aceleración continua equivalente ponderada: 15, 12 y 10 m/s^2 con tiempos de exposición de 1, 3 y 5 horas, respectivamente, durante su jornada de trabajo. Determinar $(a_{h,w})_{eq(9)}$.

$$(a_{h,w})_{eq(9)} = \left(\frac{15^2 \cdot 1 + 12^2 \cdot 3 + 10^2 \cdot 5}{9} \right)^{1/2} = 11,34 \text{ m/s}^2$$

Si a continuación se desea determinar $(a_{h,w})_{eq(4)}$, a partir de la ecuación (4.4) se calcula:

$$(a_{h,w})_{eq(4)} = 11,34 \cdot \left(\frac{9}{4} \right)^{1/2} = 17,01 \text{ m/s}^2$$

También este método de valoración puede ser aplicado a los datos medidos en bandas de octava y tercios de octava.

4.4.2 VIBRACIÓN MULTIAXIAL

Se recomienda medir la vibración para **cada** uno de los tres ejes (x, y, z) y evaluar tomando la componente de la aceleración vibratoria más alta.

En muchas herramientas, la vibración en un eje puede ser dominante y se considera aproximadamente que el potencial lesivo de la herramienta puede ser evaluado en términos de aceleración ponderada en frecuencia de ese eje dominante. Se considera que el eje es dominante cuando la magnitud en dicho eje es más del doble que a lo largo de los otros dos ejes. En la práctica, si el eje dominante se conoce por medio de los códigos de ensayo (véase Capítulo 6), no es necesario realizar la medida en los otros dos ejes.

En el caso que no haya un eje dominante, se debe combinar el resultado de los valores de la aceleración continua equivalente ponderada para cada uno de los tres ejes ($a_{x,h,w}$, $a_{y,h,w}$, $a_{z,h,w}$) para obtener un valor global de aceleración.

$$a_{h,w} = \sqrt{(a_{x,h,w})^2 + (a_{y,h,w})^2 + (a_{z,h,w})^2} \quad (4.7)$$

4.4.3 CONVERSIÓN DE ACELERACIONES MEDIDAS EN BANDAS DE OCTAVA Y DE TERCIOS DE OCTAVA A ACELERACIÓN PONDERADA EN FRECUENCIA

Los resultados del análisis en bandas de octava y tercios de octava pueden ser usados para estimar la correspondiente aceleración ponderada en frecuencia.

La aceleración ponderada en frecuencia puede calcularse por la expresión:

$$a_{h,w} = \sqrt{\sum_{j=1}^{j=n} (K_j \cdot a_{h,j})^2} \quad (4.8)$$

Donde:

K_j = Factor de ponderación de frecuencia para la j-ésima banda de octava o de tercios de octava (Tablas 3 y 4).

$a_{h,j}$ = Aceleración medida en la j-ésima banda de octava o de tercios de octava.

n = Número de bandas de octava o de tercios de octava utilizadas.

Si el espectro contiene frecuencias dominantes, pueden existir discrepancias entre la aceleración ponderada calculada por la expresión anterior y la obtenida por la medida directa, sobre todo cuando las frecuencias dominantes difieren de las frecuencias centrales de la banda de octava o de tercios de octava.

Tabla 3: Valores de K_j para la conversión de las medidas de banda de tercios de octava en medidas ponderadas

[Factores de ponderación a ser aplicados en las ecuaciones (4.8) y (4.11)]

Frecuencia (Hz)	Factor de Ponderación K_j
6,3	1
8	1
10	1
12,5	1
16	1
20	0,8
25	0,63
31,5	0,5
40	0,4
50	0,3
63	0,25
80	0,2
100	0,16
125	0,125
160	0,1
200	0,08
250	0,063
315	0,05
400	0,04
500	0,03
630	0,025
800	0,02
1000	0,016
1250	0,0125

Tabla 4: Valores de K_j para la conversión de las medidas de banda de octava en medidas ponderadas

[Factores de ponderación a ser aplicados en las ecuaciones (4.8) y (4.11)]

Frecuencia (Hz)	Factor de Ponderación K_j
8	1
16	1
31,5	0,5
63	0,25
125	0,125
250	0,063
500	0,03
1.000	0,016

4.4.4 NIVEL DE ACELERACIÓN EN dB

La magnitud de la vibración también se puede expresar como nivel de aceleración en dB. Por tanto, podemos encontrarnos en las mismas situaciones de los apartados 4.4.1.1 y 4.4.1.2 y dando los resultados en dB.

4.4.4.1 Cálculo del nivel de aceleración para un período de 4 horas cuando se conoce el nivel de aceleración para un período distinto de 4 h.

A partir de la siguiente expresión se puede determinar:

$$(L_{h,w})_{eq(4)} = (L_{h,w})_{eq(T)} + 10 \log \frac{T}{4} \quad (4.9)$$

Ejemplo:

Para el mismo trabajador del apartado 4.4.1.1, si está expuesto a un $(L_{h,w})_{eq(6)} = 140$ dB. Calcular $(L_{h,w})_{eq(4)}$.

$$(L_{h,w})_{eq(4)} = 140 + 10 \log \frac{6}{4} = 142 \text{ dB}$$

4.4.4.2 Cálculo del nivel de aceleración total ponderado en frecuencia si la exposición diaria total comprende varias exposiciones de diferentes amplitudes y duraciones.

Se puede calcular por la expresión:

$$(L_{h,w})_{eq(T)} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \left[10^{\frac{1}{10} (L_{h,w})_{eq(ni)}} \times t_i \right] \right) \quad (4.10)$$

Ejemplo:

Para el mismo trabajador del apartado 4.4.1.2, expuesto a los siguientes niveles de aceleración ponderados: 143,5, 141,5 y 140 dB, con tiempos de exposición de 1, 3 y 5 horas, respectivamente. Calcular $(L_{h,w})_{eq(9)}$.

$$(L_{h,w})_{eq(9)} = 10 \log \frac{1}{9} (10^{14,35} \cdot 1 + 10^{14,15} \cdot 3 + 10^{14} \cdot 5) = 141 \text{ dB}$$

Si a continuación se desea determinar $(L_{h,w})_{eq(4)}$, a partir de la ecuación (4.9) se calcula:

$$(L_{h,w})_{eq(4)} = 141 + 10 \log \frac{6}{4} = 142,7 \text{ dB}$$

4.4.4.3 Conversión de niveles de aceleración medidos en bandas de octava y de tercios de octava a nivel de aceleración ponderado en frecuencia.

La ecuación para la determinación del nivel de aceleración ponderado es:

$$L_{h,w} = 20 \log \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \left(K_j \cdot 10^{\frac{L_{h,j}}{20}} \right)^2} \quad (4.11)$$

Donde:

$L_{h,j}$ son los niveles de aceleración medidos en la j -ésima banda de octava o de tercios de octava y K_j y n tienen el mismo significado que en 4.4.3.

4.4.5 RELACIÓN DOSIS-EFECTO

El anexo A de la norma UNE ENV 25349 propone una relación dosis-efecto entre la $(a_{h,w})_{eq(4)}$ y el tiempo de exposición antes de que se desarrolle el DBV. Esta relación se basa en los trastornos vasculares porque son los más estudiados y fáciles de reconocer.

La Figura 4.5 y la Tabla 5 permiten determinar el tiempo de exposición necesario para que se desarrollen los problemas vasculares en la mano, en función de $(a_{h,w})_{eq(4)}$, para cada porcentaje de la población expuesta. El $(a_{h,w})_{eq(4)}$ se calcula a partir del valor eficaz de la componente dominante en un eje ponderado en frecuencia de la vibración recibida por la mano, expresada en metros por segundo al cuadrado.

Los valores de la Figura 4.5 se refieren a una exposición regular diaria a las vibraciones. Las curvas expresan la duración en años de la exposición regular a las vibraciones previa a la aparición del DBV en el 10, 20, 30, 40 y 50 % de las personas expuestas. Es posible realizar interpolaciones entre las curvas.

La relación dosis-efecto no debe aplicarse para aceleraciones ponderadas que excedan de 50 m/s², ni a tiempos de exposición que superen 25 años.

La relación dosis-efecto dada en la Figura 4.5 y en la Tabla 5 puede aproximarse por la ecuación:

$$C = \left(\frac{(a_{h,w})_{eq(4)} \cdot T_F}{95} \right)^2 \cdot 100 \quad (4.12)$$

Siendo:

C: Porcentaje de personas expuestas susceptibles de desarrollar problemas vasculares ($10 < C < 50\%$)

$(a_{h,w})_{eq(4)}$: Aceleración equivalente ponderada en frecuencia para un período de 4 horas, medida en m/s^2

TF: Tiempo de exposición previo al amoratamiento de los dedos, en años, ($1 < T_F < 25$ años)

Si se conocen los valores de C y $(a_{h,w})_{eq(4)}$, se puede determinar T_F mediante la expresión:

$$T_F = \frac{(C)^{0,5} \cdot 9,5}{(a_{h,w})_{eq(4)}} \quad (4.13)$$

Si la $(a_{h,w})_{eq(4)}$ es suficientemente grande, la probabilidad de desarrollar el dedo blanco aumenta con el número de años de exposición. Hay evidencia de que la exposición acumulada antes del primer ataque de dedo blanco es inversamente proporcional a $(a_{h,w})_{eq(4)}$. Por ejemplo, si $(a_{h,w})_{eq(4)}$ se divide por 2, el tiempo de exposición antes del primer ataque se multiplica por 2.

Tabla 5: Tiempo de exposición en años para diferentes porcentajes de población expuesta y para distintas aceleraciones ponderadas

Aceleración ponderada $(a_{h,w})_{eq(4)}$ m/s^2	Porcentaje de población (C)				
	10	20	30	40	50
	Tiempo de exposición (años)				
2	15	23	> 25	> 25	> 25
5	6	9	11	12	14
10	3	4	5	6	7
20	1	2	2	3	3
50	< 1	< 1	< 1	1	1

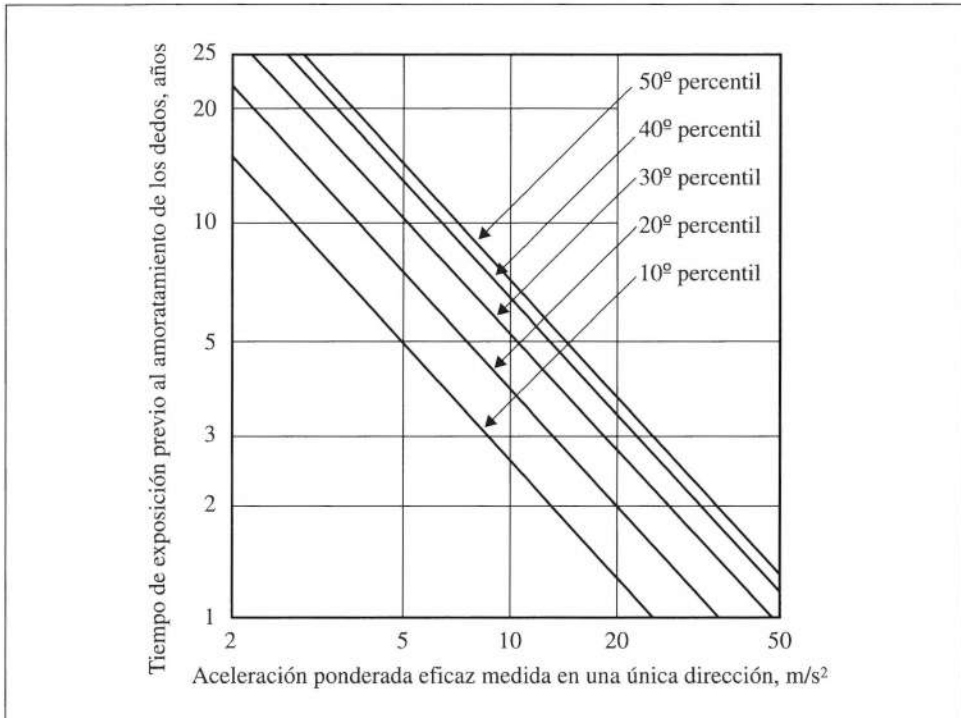


Fig. 4.5: Períodos de exposición para distintos porcentajes de un grupo de población expuesta a vibraciones en los tres ejes de coordenadas

4.5 MEDIDAS PREVENTIVAS

Medidas preventivas de carácter médico asociadas a una exposición regular a la vibración transmitida por la mano

Cualquier trabajador que pueda estar expuesto a vibraciones transmitidas por la mano debe, previamente a su contratación, ser examinado físicamente y, además:

- a) La historia de su exposición anterior a vibraciones debe ser registrada.
- b) Todos los trabajadores que utilicen equipos vibrantes deben ser advertidos sobre el riesgo de exposición a vibraciones de la mano y brazo.

c) Deben ser cuidadosamente examinadas, antes de utilizar un material vibrante, las personas que presentan los problemas de salud siguientes:

- Problemas de síndrome de Raynaud
- Problemas que alteren la circulación sanguínea de las manos
- Accidentes previos de las manos que hayan provocado problemas circulatorios o deformación de los huesos y las articulaciones
- Otras causas de fenómenos secundarios del síndrome de Raynaud
- Problemas del sistema nervioso periférico

d) Se deben establecer disposiciones para el registro de los síntomas y la vigilancia médica a intervalos regulares.

Medidas preventivas de carácter técnico destinadas a reducir la vibración transmitida por la mano

- a) Elegir las máquinas con el nivel de emisión de vibración más bajo posible.
- b) Mantener los equipos de acuerdo con las instrucciones de los fabricantes.

Medidas administrativas destinadas a reducir la vibración transmitida por la mano

- a) Formar al trabajador en el uso adecuado del equipo.
- b) Organizar el sistema de trabajo para incluir períodos exentos de vibraciones.

Información a los trabajadores que utilizan equipos vibratorios

- a) Los trabajadores deben llevar ropa adecuada que permita mantener el cuerpo seco y la temperatura corporal a un nivel aceptable. Cuando sea posible, se deben llevar guantes adecuados para la manipulación del material vibrante (véase 4.5.1).

- b) El trabajador debe dejar que la herramienta realice su trabajo y sujetarla de la forma más débil posible, compatible con un trabajo seguro. Cuando se pueda, la herramienta debe permanecer el mayor tiempo posible sobre la pieza de trabajo o el soporte.
- c) Cuando se utilicen herramientas vibrátiles, no se debe fumar ya que la nicotina reduce la circulación de la sangre a las manos y a los dedos.
- d) Si se presentan signos de amoratamiento de los dedos, o largos períodos de hormigueo o de entumecimiento, se recomienda pedir consejo médico.
- e) Consultar al servicio postventa correspondiente si se producen vibraciones anormales.
- f) La herramienta no debe expulsar gases o fluidos fríos sobre las manos del trabajador.

4.5.1 CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LOS GUANTES ANTI-VIBRATORIOS

En la actualidad, los trabajadores expuestos a VMB no disponen de guantes antivibratorios que protejan adecuadamente sus manos. Los estudios han mostrado que la mayoría de los guantes proporcionan una pequeña atenuación de la vibración en las frecuencias más perjudiciales para el trabajador, y en algunos casos incrementan el valor de vibración en la mano.

Sin embargo, los guantes pueden llevarse para proporcionar una protección física contra impactos, bordes afilados, superficies calientes, etc. En ambientes fríos, puede ser adecuado llevar guantes para mantener las manos calientes y así retardar el desarrollo del DBV en trabajadores expuestos.

Cuando sea posible, tales guantes deberían ser seleccionados de modo que asegure que no incrementan significativamente la vibración transmitida a la mano. En algunos casos será posible seleccionar guantes que atenúen al menos en las frecuencias más altas del rango de interés.

4.6 LEGISLACIÓN COMUNITARIA. PROPUESTA MODIFICADA DE DIRECTIVA DE AGENTES FÍSICOS

La Comisión de la Unión Europea ha elaborado una propuesta modificada de Directiva del Consejo sobre las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de agentes físicos.

La propuesta modificada ha sido publicada en el D.O.C.E. N° C230/3 del 19.8.94.

Entre los agentes físicos contemplados se encuentra la vibración transmitida a la mano, y para ello se establece lo siguiente:

4.6.1 RIESGO

Se refiere al riesgo para la salud y la seguridad derivado de la exposición a la vibración transmitida a la mano y al brazo: trastornos vasculares, de huesos y articulaciones, neurológicos y musculares.

Como **indicador de riesgo** se utiliza la exposición a la vibración transmitida a la mano $A(8)$, determinada con arreglo a la British Standard 6842:1987 por la siguiente expresión:

$$(a_{h,w})_{eq(8)} = A(8) = \left(\frac{1}{T_8} \int_0^{\tau} (a_{h,w}(t))^2 dt \right)^{1/2} \quad (4.13)$$

Siendo $a_{h,w}(t)$ la suma vectorial (raíz cuadrada de la suma) de los cuadrados de las aceleraciones eficaces ponderadas en frecuencia en las coordenadas ortogonales (x, y, z) con la ponderación de frecuencia definida en dicha norma:

$$a_{h,w} = \sqrt{(a_{x,h,w})^2 + (a_{y,h,w})^2 + (a_{z,h,w})^2} \quad (4.14)$$

No obstante, si un eje produce un valor ponderado inferior al 50% del valor máximo determinado en el mismo punto, pero en otro eje, se podrá considerar irrelevante.

4.6.2 VALORES

Nivel umbral = $A(8) = 1 \text{ m/s}^2$

Se define nivel umbral como el valor de la exposición por debajo del cual la exposición continua o repetida carece de efectos negativos sobre la salud y la seguridad de los trabajadores.

Nivel de acción = $A(8) = 2,5 \text{ m/s}^2$

Se define nivel de acción como el valor de la exposición a partir del cual se debe:

- Dar información a los trabajadores expuestos a este nivel.*
- Impartir formación sobre la aplicación de medidas de control.*
- Proporcionar información sobre la vibración producida por los equipos de trabajo en un período de referencia de 8 horas.*
- Establecer el programa de medidas técnicas y/o de organización del trabajo destinadas a reducir la exposición.*

Se considera que $A(8)$ es probable que alcance $2,5 \text{ m/s}^2$ cuando el equipo de trabajo utilizado transmita al sistema mano-brazo una aceleración equivalente a corto plazo (unos pocos minutos) igual a dicho valor numérico.

Valor límite de exposición = $A(8) = 5 \text{ m/s}^2$

Se define el valor límite de exposición como aquel valor a partir del cual la persona no protegida corre riesgos inaceptables. Sobrepasar este valor está prohibido y debe evitarse mediante la aplicación de las disposiciones de esta Directiva.

4.6.3 ACTIVIDADES CON RIESGO INCREMENTADO

Aquella actividad que precise la utilización de equipos de trabajo que transmitan al sistema de mano y brazo una aceleración equivalente a corto plazo (unos pocos minutos) igual o superior a $A(8) = 20 \text{ m/s}^2$ debe ser declarada ante la autoridad com-

petente. Los Estados miembros velarán por que se adopten las medidas apropiadas a fin de controlar el riesgo que resulta de estas actividades.

4.6.4 MEDICIÓN Y EVALUACIÓN

Cuando los aparatos deban ser sostenidos con ambas manos, las mediciones deberán realizarse en cada mano. El peligro se expresará como la aceleración equivalente de la energía más elevada, y se dará información sobre la otra mano.

En los casos en que no pueda cuantificarse de manera fiable el nivel de vibración, deberá evaluarse la probabilidad de que se produzca una exposición superior al nivel de acción (observación de las prácticas de trabajo e información sobre el equipo utilizado) a fin de poder estimar los riesgos existentes. Si no puede descartarse que se produzca una exposición superior a nivel de acción, deberán aplicarse las medidas preventivas correspondientes.

4.6.5 REDUCCIÓN DEL RIESGO

Mientras no se disponga de equipos de protección individual adecuados y prácticos, las disposiciones dirigidas a reducir la exposición se complementarán con medidas encaminadas a reducir el riesgo derivado de dicha exposición.

Cuando la actividad implique el uso de equipos de trabajo que transmitan al sistema de mano y brazo una aceleración equivalente a corto plazo (de pocos minutos) que sobrepase 10 m/s^2 , deberá realizarse un mayor esfuerzo para reducir el peligro, dando prioridad al uso de equipos y procesos de baja vibración, incluida la revisión de la concepción de los productos y de los procedimientos de trabajo. Hasta que no se hayan aplicado de manera efectiva, se deberá reducir la duración de la exposición continua.

La Comisión y los Estados miembros garantizarán una aplicación coordinada y dinámica de las disposiciones de esta acción.

4.6.6 EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL

No se dispone en la actualidad de ningún equipo de protección individual adecuado contra la vibración; cuando se disponga de dicho equipo, deberá utilizarse.

4.6.7 INFORMACIÓN Y FORMACIÓN

La información y formación de los trabajadores deberá incluir, como mínimo:

- cómo y por qué detectar y comunicar los signos de lesiones,
- prácticas de trabajo seguras a fin de reducir a un mínimo la exposición a la vibración,
- medidas para reducir el riesgo resultante.

4.6.8 VIGILANCIA DE LA SALUD

Los trabajadores expuestos a una vibración de la mano y el brazo que sobrepase $A(8) = 2,5 \text{ m/s}^2$ tendrán derecho a la vigilancia de su salud con objeto de facilitar la detección precoz del síndrome de vibración, y a exigir exámenes regulares.

4.6.9 EQUIPOS DE TRABAJO

Debe formar parte de la información facilitada por el fabricante la señalización del equipo que transmita al sistema de mano y brazo una aceleración equivalente a corto plazo (unos pocos minutos) que sea igual o superior a 20 m/s^2 .

4.6.10 INTERFERENCIAS

Cuando la vibración interfiera en la adecuada manipulación de controles o en la lectura de indicadores, se debe limitar a valores inferiores a los establecidos en la presente Directiva.

4.6.11 RIESGOS INDIRECTOS

Cuando la vibración interfiera en la estabilidad de estructuras o en la adecuada sujeción de las juntas, se debe controlar el riesgo indirecto para los trabajadores.

CAPÍTULO 5

VIBRACIONES DE CUERPO COMPLETO

5.0 INTRODUCCIÓN

Se define vibración de cuerpo completo (VCC) a la vibración que ocurre cuando una gran parte del peso del cuerpo humano descansa en una superficie vibrante.

En la mayoría de los casos, la exposición a VCC se produce en posición sentado, transmitiéndose la vibración a través del asiento y, en algunas ocasiones, también a través del respaldo. En posición de pie, la vibración se transmite a través de los pies y en posición yacente, a través de varias partes del cuerpo simultáneamente.

La exposición a VCC está ampliamente extendida en el mundo laboral y puede ser origen de daños a la salud. Según las estimaciones realizadas en algunos países europeos, de un 4 a un 7% de todos los trabajadores están expuestos a VCC.

Los grupos con mayor riesgo son:

- Conductores de vehículos todo terreno (por ejemplo maquinaria de obras públicas, tractores, etc.).
- Conductores de carretillas elevadoras.
- Conductores de camiones y autobuses.
- Pilotos de helicópteros.
- Tripulaciones de barcos.

La exposición a VCC puede ser origen de: molestias (por ejemplo disconfort), reducción por fatiga de la capacidad de trabajo o daños para la salud. Además, la vibración de cuerpo completo de baja frecuencia (generalmente $< 0,5$ Hz) puede ser la causa del mareo inducido por el movimiento.

La mayoría de las investigaciones sobre los efectos de la VCC en el cuerpo humano se han centrado en los efectos agudos, en el disconfort y en la reducción por fatiga de la capacidad de trabajo.

Aunque se sabe menos sobre los daños para la salud derivados de la exposición a VCC, investigaciones biodinámicas y estudios epidemiológicos han evidenciado

daños para la salud en trabajadores expuestos durante mucho tiempo a VCC. La principal afección suele ser daños en la zona lumbar de la columna vertebral y en el sistema nervioso conectado a ella. Existe una probabilidad menor de daños en el sistema digestivo, en los órganos reproductores femeninos, en los vasos sanguíneos periféricos y en el sistema vestibular.

Dolor y alteraciones en la espalda

Una exposición prolongada a VCC está fuertemente asociada con problemas en la espalda, centrándose la mayoría de las investigaciones en la parte lumbar del sistema musculoesquelético.

Distintas investigaciones epidemiológicas han evidenciado que la exposición a VCC puede ser causa de daños en la columna y han permitido obtener, en grupos de expuestos, una alta tasa de prevalencia de dolores en la parte baja de la espalda, hernia discal y degeneración temprana de la columna (espondilosis, osteocondrosis intervertebral, artrosis).

No se ha observado un nivel de VCC que no produzca daños y los datos obtenidos parecen sugerir que, bajo ciertas circunstancias, pueden ocurrir daños para la salud incluso con bajos niveles de vibración.

La información disponible sugiere que un aumento de la intensidad de la vibración y del tiempo de exposición implica un aumento del riesgo, mientras que los períodos de descanso disminuyen el riesgo.

Existe alguna indicación de que la exposición a vibraciones de cuerpo completo de tipo choque, en el eje vertical, puede presentar un elevado riesgo.

Pese a todo lo dicho, con los datos epidemiológicos actualmente disponibles, no se puede obtener una relación firme entre la exposición a VCC y el daño para la salud.

Los estudios epidemiológicos y experimentales tratan de clarificar el mecanismo exacto por el que la exposición a VCC conduce a daños en la columna vertebral. Aunque existen varias hipótesis de mecanismos de acción, la que parece más aceptada en los últimos años es aquella que admite que la vibración origina una degeneración de la parte lumbar de la columna.

Varios datos muestran que la combinación de postura sentado con una exposición a VCC (como sucede en la conducción de vehículos) puede aumentar el riesgo de daños en la columna. También pueden jugar su papel otros factores: postura de trabajo, características antropométricas, tono muscular, sobrecarga física y susceptibilidad individual (edad, problemas preexistentes, fuerza muscular, etc.).

La conducción de vehículos no sólo implica exposición a VCC, sino también a otros factores que incrementan la tensión en la espalda. El más importante es el estar sentado durante mucho tiempo en un espacio limitado y con malas posturas (por ejemplo frecuentes giros de la columna), levantamiento y manejo manual de cargas (por ejemplo en conductores de camiones de suministro), daños traumáticos, movimientos inesperados y condiciones ambientales desfavorables.

En algunos países de la Unión Europea (por ejemplo Bélgica y Alemania) los problemas de espalda en trabajadores expuestos a VCC, bajo ciertas condiciones de intensidad de la vibración y de tiempo de exposición, son considerados enfermedad profesional compensable económicamente.

Otros efectos sobre la salud

Problemas digestivos

Se han realizados varios estudios para determinar los efectos a largo plazo de la exposición a VCC sobre el aparato digestivo. En unos estudios en conductores de vehículos se encontró una elevada prevalencia de molestias gastrointestinales, úlceras pépticas y gástricas. En otros estudios no se encontraron efectos adversos.

Por lo tanto la cuestión de si la exposición a VCC conduce a problemas digestivos permanece abierta, aunque es posible que sea un efecto menor.

Efectos sobre los órganos reproductores femeninos

La vibración puede tener algunos efectos específicos en la mujer. En estudios realizados en la industria del hormigón, se detectaron desórdenes en la menstruación, inflamación interna y nacimientos anormales en mujeres expuestas a vibración de frecuencias de 40 a 55 Hz. Pese a todo, se necesita más investigación al respecto.

Problemas circulatorios

En la literatura disponible se sugiere que existe una relación entre la exposición a VCC y la ocurrencia de hemorroides y venas varicosas. En esta relación, la exposición a VCC parece que es un factor que actúa, en combinación con posturas sentadas de larga duración, en conductores. Se supone que una elevada presión intraabdominal juega un papel en los mecanismos patogénicos, aunque la evidencia no es muy consistente.

Problemas cocleovestibulares

Se supone que la exposición prolongada a VCC potencia la pérdida auditiva inducida por el ruido. Se ha encontrado que en exposiciones combinadas a ruido y vibraciones, la pérdida temporal del umbral de audición es más elevada en las altas frecuencias (6 a 10 kHz) que cuando sólo existe exposición a ruido. El mecanismo patogénico de dicho efecto no ha sido aún clarificado.

5.1 MEDIDA Y EVALUACIÓN DE LA VIBRACIÓN DE CUERPO COMPLETO

Los criterios para la medida y evaluación de la vibración de cuerpo completo, expuestos a continuación, siguen los establecidos en el proyecto de norma ISO DIS 2631-1.2 que revisa y unifica las normas ISO 2631-1:1985 e ISO 2631-2:1985. La futura norma ISO 2631 tendrá dos partes:

- Parte 1: Vibraciones y choques mecánicos. Evaluación de la exposición humana a la vibración de cuerpo completo. Requisitos generales.
- Parte 2: Vibraciones y choques mecánicos. Evaluación de la exposición humana a la vibración de cuerpo completo. Vibraciones continuas e inducidas por choques en edificios.

En la parte 1 de ISO DIS 2631-1.2 se dan criterios para medida y evaluación de la VCC relativos a:

- Efectos sobre la salud

- Confort
- Mareo inducido por el movimiento.

En nuestro caso, **sólo consideraremos los efectos sobre la salud.**

5.1.1 MEDIDA DE LA VIBRACIÓN (CON RESPECTO A LOS EFECTOS SOBRE LA SALUD)

5.1.1.1 Símbolos y subíndices.

En lo que sigue, se utilizarán los siguientes símbolos y subíndices:

– Símbolos

a: valor rms de la aceleración en m/s^2

$W(f)$: ponderación de frecuencia

– Subíndices

- d, k - distintas curvas de ponderación de frecuencia.
- w - valores de aceleración ponderada en frecuencia.
- x, y, z - dirección de la vibración.
- v - vector suma de las aceleraciones totales ponderadas en los ejes x, y, z.

5.1.1.2 Unidades de aceleración.

Aceleración a: (m/s^2)

En caso de frecuencias extremadamente bajas, se puede obtener la velocidad y después convertirla en aceleración.

5.1.1.3 Dirección de la medida.

La vibración debe medirse de acuerdo con el sistema de coordenadas basicéntricas que se indica en la Fig. 5.1.

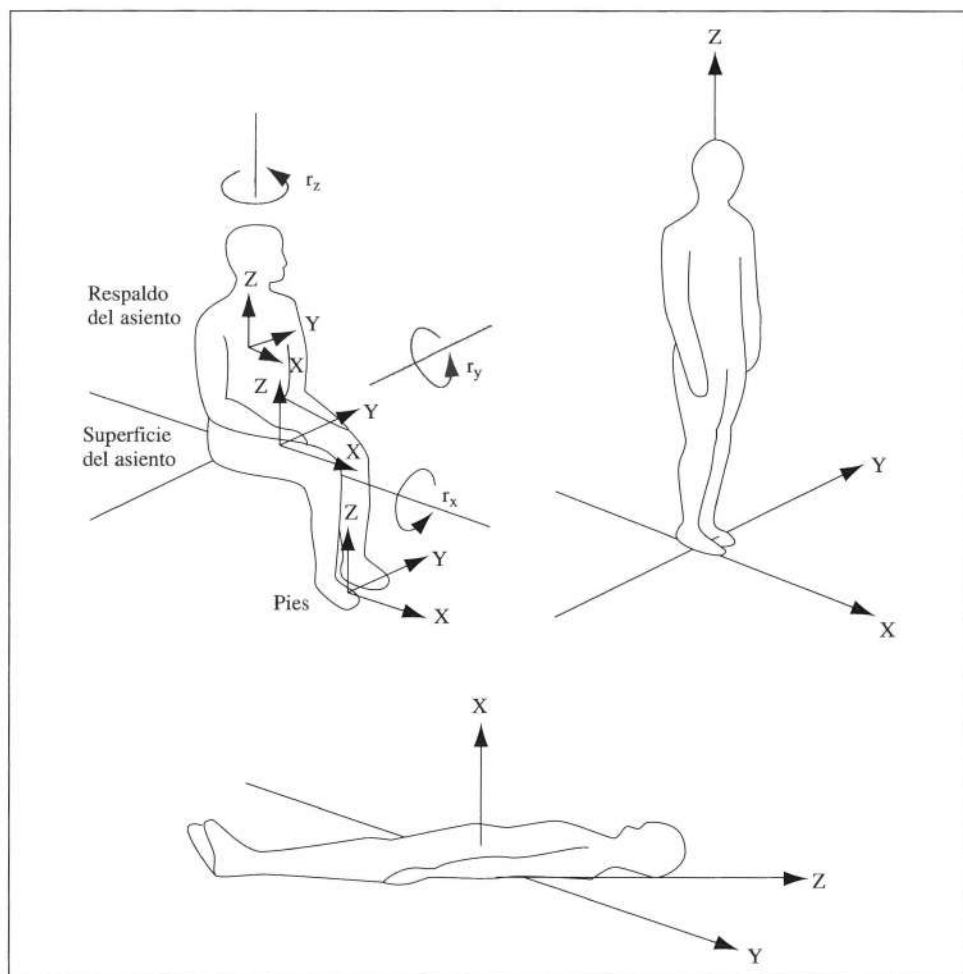


Fig. 5.1: Ejes basicéntricos del cuerpo humano.

Si no es posible obtener un alineamiento preciso de los transductores con los ejes del sistema de coordenadas basicéntricas, se pueden variar los ejes de los trans-

ductores hasta 15°. Para una persona sentada en un asiento inclinado, la orientación de los ejes debe determinarse por los ejes del cuerpo y el eje z no tiene por qué ser vertical.

Los transductores localizados en un punto de medida deben posicionarse ortogonalmente. Los acelerómetros orientados en diferentes ejes, en una única posición de medida, deben estar tan juntos como sea posible.

5.1.1.4 Localización de la medida.

La vibración que se transmite al cuerpo debe medirse entre el cuerpo y la superficie que vibra, por lo tanto, los transductores deben colocarse de modo que indiquen la vibración en la interfaz entre el cuerpo y la fuente de vibración.

Para personas sentadas se consideran tres áreas de contacto entre el cuerpo y la superficie vibrátil:

- Superficie del asiento: La medida debe hacerse debajo de las posaderas.
- Respaldo trasero: La medida debe hacerse en el área de apoyo principal del cuerpo.
- Pies: La medida debe hacerse en la superficie en la que se apoyan los pies con más frecuencia.

Para personas yacentes la medida hay que hacerla en la superficie de apoyo debajo de la pelvis, en la espalda y en la cabeza. En todos los casos hay que indicar la localización de la medida.

Si no es posible la medida directa, se puede medir en una parte rígida de la estructura del vehículo o del edificio, tal como el centro de rotación o el centro de gravedad. La evaluación en términos de respuesta humana requiere un cálculo posterior.

La medida en el respaldo trasero debe hacerse preferentemente en la interfaz con el cuerpo. Si no puede hacerse, se ha de medir en el bastidor del asiento y corregir el valor considerando la transmisibilidad del material almohadillado del respaldo.

La vibración que se transmite por estructuras rígidas debe medirse en la superficie que la soporta y cerca del área de contacto entre el cuerpo y esa superficie (10 cm del centro de ese área).

La vibración que se transmite al cuerpo desde un material no rígido (por ejemplo, un asiento) debe medirse con el transductor interpuesto entre la persona y las principales áreas de contacto con la superficie. Ello puede lograrse montando los transductores en un soporte adecuado. El soporte no debe alterar la distribución de presiones en la superficie del material resiliente. En la norma UNE EN 30326-1:1994 se da el diseño de un disco semirrígido para el montaje de acelerómetros (Fig. 5.2).

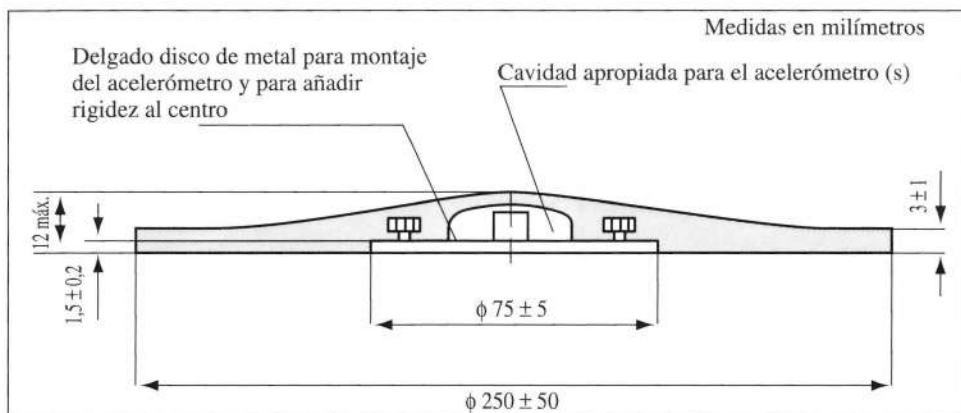


Fig. 5.2: Diseño de un disco semirrígido para el montaje de acelerómetros según UNE EN 30326-1:1994.

5.1.1.5 Requisitos generales para el acondicionamiento de la señal.

La respuesta en frecuencia del transductor y del acondicionador de señal asociado debe ser adecuado para el rango de frecuencias de 0,5 a 80 Hz.

El rango dinámico del equipo que acondiciona la señal será adecuado para las señales más altas y más bajas. La señal, antes de ser analizada, debe pasar por un filtro paso bajo con frecuencia de corte (- 3 dB) aproximadamente igual a 1,5 veces la frecuencia más alta de interés.

5.1.1.6 Duración de la medida.

La duración de la medida debe ser suficiente para asegurar una precisión estadística razonable y para asegurar que la vibración es típica de la exposición que se está evaluando.

Si la exposición se compone de distintos períodos de características diferentes, será necesario hacer un análisis separado de cada período.

Para señales aleatorias estacionarias, la precisión de la medida depende del ancho de banda del filtro y de la duración de la medida. Por ejemplo, analizando en tercios de octava, un intervalo de confianza del 90 % requiere una duración mínima de medida de 108 segundos a 1 Hz de frecuencia límite inferior (LLF) y 227 segundos a 0,5 Hz.

Normalmente el período de medida es mucho mayor, para que sea representativo de la exposición de la vibración (típicamente de 5 a 20 minutos).

5.1.1.7 Parámetro básico de medida: aceleración rms ponderada en frecuencia.

La medida de la vibración de cuerpo completo siempre debe incluir la aceleración rms ponderada en frecuencia, definida por:

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.1)$$

Siendo:

$a_w(t)$ = Aceleración rms ponderada en frecuencia en m/s^2 .

T = Duración de la medida en segundos.

Las redes de ponderación de frecuencia se indican en la figura 5.3. En la figura 5.4 se indican los valores de ponderación para cada red y en la figura 5.5 su representación gráfica.

Ponderación de frecuencia	Eje de medida
W_k	Eje z. Posición sentado
W_d	Eje x. Posición sentado Eje y. Posición sentado

Fig. 5.3: Redes de ponderación de frecuencia para evaluación de efectos sobre la salud.

f (Hz)	W _k (x 1.000)	W _k (dB)	W _d (x 1.000)	W _d (dB)
0,1	31,2	-30,11	62,4	-24,09
0,125	48,6	-26,26	97,3	-20,24
0,16	79,0	-22,05	158	-16,01
0,2	121	-18,33	243	-12,28
0,25	182	-14,81	365	-8,75
0,315	263	-11,60	530	-5,52
0,4	352	-9,07	713	-2,94
0,5	418	-7,57	853	-1,38
0,63	459	-6,77	944	-0,50
0,8	477	-6,43	992	-0,07
1	482	-6,33	1011	0,10
1,25	484	-6,29	1008	0,07
1,6	494	-6,12	968	-0,28
2	531	-5,49	890	-1,01
2,5	631	-4,01	776	-2,20
3,15	804	-1,90	642	-3,85
4	967	-0,29	512	-5,82
5	1039	0,33	409	-7,76
6,3	1054	0,46	323	-9,81
8	1036	0,31	253	-11,93
10	988	-0,10	212	-13,91
12,5	902	-0,89	161	-15,87
16	768	-2,28	125	-18,03
20	636	-3,93	100	-19,99
25	513	-5,80	80,0	-21,94
31,5	405	-7,86	63,2	-23,98
40	314	-10,05	49,4	-26,13
50	246	-12,19	38,8	-28,22
63	186	-14,61	29,5	-30,60
80	132	-17,56	21,1	-33,53
100	88,7	-21,04	14,1	-36,99
125	54,0	-25,35	8,63	-41,28
160	28,5	-30,91	4,55	-46,84
200	15,2	-36,38	2,43	-52,30
250	7,90	-42,04	1,26	-57,97
315	3,98	-48,00	0,64	-63,92
400	1,95	-54,20	0,31	-70,12

NOTA.- Los valores han sido calculados incluyendo la limitación de banda.

Fig. 5.4: Valores de ponderación de frecuencia en tercios de octava para evaluación de los efectos sobre la salud.

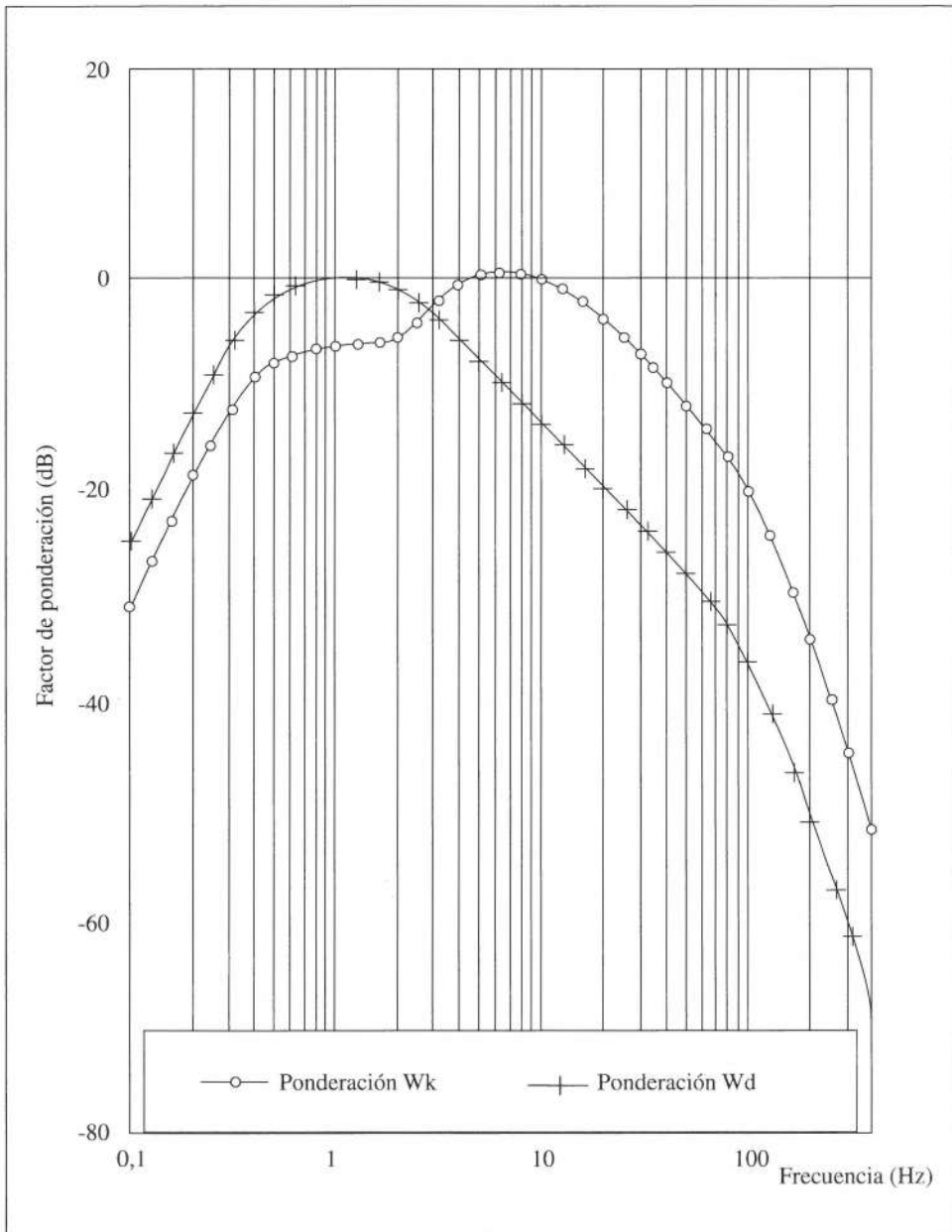


Fig. 5.5: Curvas de ponderación de frecuencia Wk y Wd.

5.1.1.8 Otros parámetros adicionales de medida.

Para algunos tipos de vibraciones, especialmente aquellos que contienen choques ocasionales y altos valores del factor de cresta (véase 2.12.2), es preciso medir otros parámetros que ayudarán a realizar una evaluación más completa.

En la determinación del factor de cresta, el valor de pico debe determinarse en el período de medida, esto es, en el período de tiempo utilizado para la integración del valor rms.

Existen dos parámetros adicionales de medida:

- El valor rms dinámico
- El valor de la dosis de vibración a la cuarta potencia

El valor rms dinámico

Tiene en cuenta los choques ocasionales y la vibración transitoria utilizando una pequeña constante de tiempo de integración. La magnitud de la vibración se define como **valor máximo transitorio de la vibración (Maximum Transient Vibration Value - MTVV)**, dado como el máximo en el tiempo de $a_w(t_0)$ definido por

$$a_w(t_0) = \left[\frac{1}{\tau} \int_{t_0 - \tau}^{t_0} a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

$a_w(t)$ = valor instantáneo ponderado en frecuencia de la aceleración.

τ = tiempo de integración para el promediado dinámico.

t = tiempo (variable de integración).

t_0 = tiempo de observación (tiempo instantáneo).

Esta fórmula que define una integración lineal puede aproximarse por una integración exponencial (véase UNE ENV 28041:1994).

$$a_w(t_0) = \left[\frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{t_0} a_w^2(t) e^{\left[\frac{t-t_0}{\tau}\right]} dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.3)$$

La diferencia en el resultado es muy pequeña cuando se aplica a choques de corta duración comparados con τ y algo mayor (hasta un 30 %) cuando se aplica a choques y transitorios de más larga duración.

$$MTVV = \max \{a_w(t_0)\} \quad (5.4)$$

Es decir, la mayor magnitud de $a_w(t_0)$ leída durante el período de medida T.

Al medir MTVV, se recomienda utilizar $\tau = 1$ s (corresponde aproximadamente a la integración 'slow' del sonómetro).

El valor de la dosis de vibración a la cuarta potencia

Es más sensible a los picos que el método básico de evaluación. Utiliza, como base para el promediado, la cuarta potencia de la aceleración, en vez del cuadrado. La magnitud de la vibración se define como **valor de la dosis de vibración (Vibration Dose Value - VDV)**:

$$VDV = \left[\int_0^T a_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5.5)$$

$a_w(t)$ = valor instantáneo ponderado en frecuencia de la aceleración.

T = duración de la medida

Cuando la exposición consiste en dos o más períodos de diferentes magnitudes, VDV debe calcularse hallando la raíz cuarta de la suma de los valores individuales de VDV elevados a la cuarta potencia.

$$VDV_{TOTAL} = \left[\sum_{i=1}^n (VDV_i)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5.6)$$

5.1.1.9 Ponderación de frecuencia.

La manera en la que afecta la vibración a la salud depende del contenido de frecuencia de la vibración. Además se necesitan distintas redes de ponderación para diferentes ejes.

Para los daños contra la salud se utilizan las redes de ponderación (Fig. 5.3, 5.4 y 5.5)

W_k : para el eje z.

W_d : para los ejes x e y..

La limitación de las bandas superior e inferior de frecuencia se hace con filtros paso bajo y paso alto tipo Butterworth con una pendiente asintótica de -12 dB/octava. Las frecuencias de corte de los filtros están un tercio de octava por fuera de los rangos de frecuencias nominales.

Dentro de la bandas nominales de frecuencia y a un tercio de octava de los límites de frecuencia, la tolerancia de la ponderación combinada con la limitación de banda deberá ser ± 1 dB. Fuera de ese rango la tolerancia debe ser ± 2 dB (véase también UNE ENV 28041:1994)⁷.

La señal de aceleración puede analizarse bien con ancho de banda constante bien con ancho de banda proporcional (por ejemplo en tercios de octava).

El valor rms ponderado en frecuencia puede determinarse ponderando y sumando adecuadamente los datos en banda estrecha o en tercios de octava

En la figura 5.4 se dan los factores de corrección para datos en tercios de octava para las redes W_d y W_k . La aceleración global ponderada se determinará por:

$$a_w = \left(\sum_{i=0}^{i=n} (w_i \cdot a_i)^2 \right)^{1/2} \quad (5.7)$$

a_w = Aceleración global ponderada en m/s^2

⁷ Actualmente en proceso de revisión.

w_i = Factor de ponderación para la banda i en tercios de octava (Fig. 5.4)

a_i = Valor rms de la aceleración en la banda i de tercio de octava

5.1.1.10 Combinación de vibraciones en más de una dirección.

Cuando los valores de las aceleraciones ponderadas en frecuencia medidas en dos o más ejes tienen valores comparables, es necesario calcular el valor total de la aceleración, mediante la expresión:

$$a_v = \left(1,4^2 \cdot a_{wx}^2 + 1,4^2 \cdot a_{wy}^2 + a_{wz}^2 \right)^{1/2} \quad (5.8)$$

a_v = Valor total de la aceleración ponderada

a_{wx}, a_{wy}, a_{wz} = Aceleraciones rms ponderadas en los ejes x,y,z.

5.1.2 EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS SOBRE LA SALUD

En este apartado se va a determinar el proceso de evaluación de la vibración de carácter periódico, aleatorio y transitorio sobre la salud de personas regularmente expuestas a vibración de cuerpo completo durante el trabajo.

Se aplica a personas **sentadas** puesto que se **desconocen los efectos de la vibración sobre la salud de personas de pie, reclinadas y en posición yacente**.

El método es aplicable a vibraciones en el rango de 0,5 a 80 Hz que se transmiten a las personas sentadas a través del asiento, a lo largo de los ejes basicéntricos x,y,z del cuerpo humano (Fig. 5.1). Si se ha establecido que no son importantes las vibraciones por debajo de 1 Hz, el rango puede sustituirse por 1 a 80 Hz.

No existen datos suficientes para facilitar una relación entre la exposición a la vibración y los riesgos contra la salud. Por lo tanto, no es posible evaluar la vibración de cuerpo completo en términos de probabilidad de riesgo a varias magnitudes de vibración y tiempos de exposición.

5.1.2.1 Utilización de la aceleración rms ponderada en frecuencia.

Admitiendo que las respuestas están relacionadas con la energía, dos exposiciones son equivalentes cuando:

$$a_{w1} \cdot T_1^{1/2} = a_{w2} \cdot T_2^{1/2} \quad (5.9)$$

Donde:

a_{w1} y T_1 son los valores de la aceleración rms ponderada y del tiempo de exposición del primer período de exposición, respectivamente.

a_{w2} y T_2 son los valores de la aceleración rms ponderada y del tiempo de exposición del segundo período de exposición, respectivamente.

La zona de precaución correspondiente a esta ecuación es la comprendida entre las dos líneas de rayas de la figura 5.6.

También en la figura 5.6 se indica una zona rayada. Para exposiciones por debajo de dicha zona, no se han documentado claramente y/o no se han observado objetivamente efectos contra la salud. La zona rayada es una zona de precaución con respecto a los efectos potenciales contra la salud; por encima de la zona, los riesgos son probables. La recomendación está basada principalmente en exposiciones entre 4 y 8 h. Las exposiciones inferiores a 4 h deben tratarse con extremo cuidado.

Otros estudios indican una relación con el tiempo de acuerdo con la expresión:

$$a_{w1} \cdot T_1^{1/4} = a_{w2} \cdot T_2^{1/4} \quad (5.10)$$

La zona de precaución correspondiente a esta ecuación es la comprendida entre las dos líneas de puntos de la figura 5.6.

La zona de precaución para tiempos de exposición entre 4 y 8 h es aproximadamente igual para ambas ecuaciones en la mayoría de las observaciones realizadas.

El valor rms de la aceleración ponderada y el tiempo de exposición debe compararse con la zona indicada en la figura 5.6.

Para caracterizar la exposición diaria, debe calcularse o medirse la aceleración ponderada en frecuencia para 8 horas, de acuerdo con la ecuación:

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.11)$$

con $T = 8$ horas

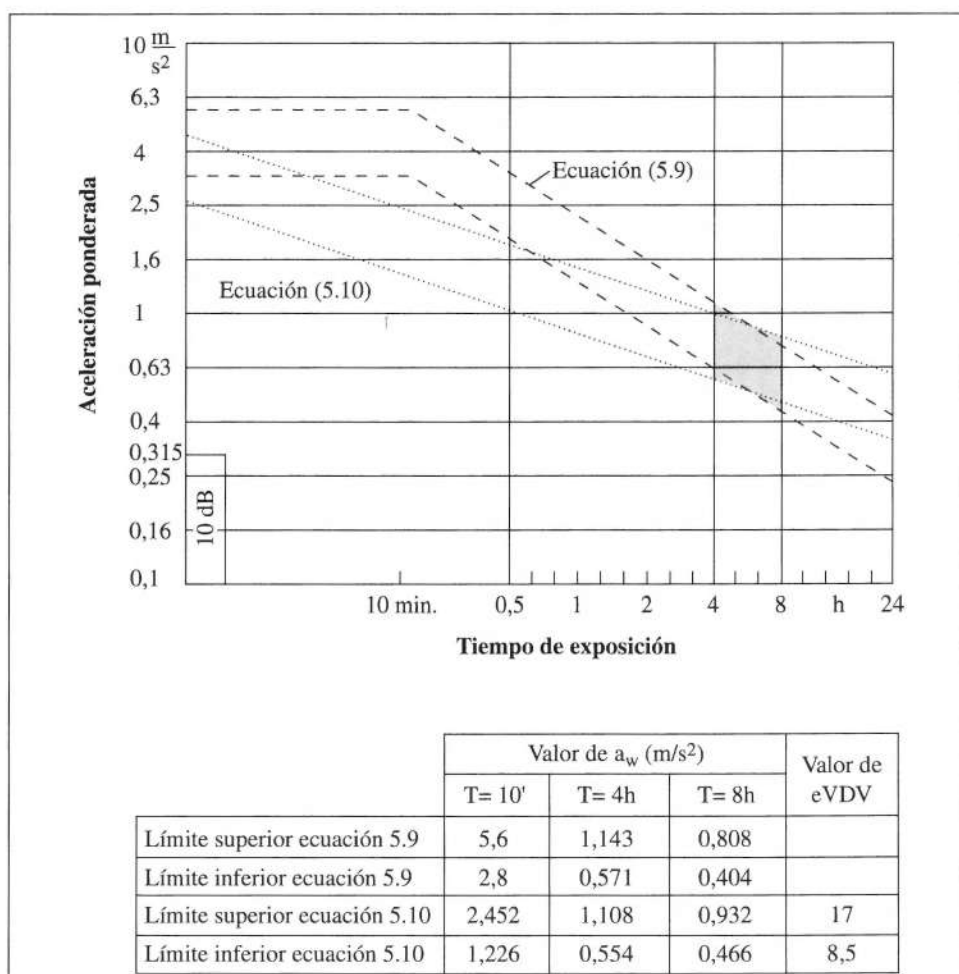


Fig. 5.6

Cuando la exposición a la vibración se compone de dos o más períodos de exposición de diferentes magnitudes y duraciones, la aceleración equivalente al período total de exposición se calcula por:

$$a_{w,e} = \left(\frac{\sum a_{w,i}^2 \cdot T_i}{\sum T_i} \right)^{1/2} \quad (5.12)$$

$a_{w,e}$: Aceleración total equivalente (rms en m/s^2)

$a_{w,i}$: Aceleración rms en m/s^2 para el período T_i

Algunos estudios indican una aceleración total equivalente distinta dada por:

$$a_{w,e} = \left(\frac{\sum a_{w,i}^4 \cdot T_i}{\sum T_i} \right)^{1/4} \quad (5.13)$$

En algunos estudios se ha utilizado un valor estimado del valor de la dosis de vibración (**Estimation Vibration Dose Value (eVDV)**) dado por:

$$eVDV = 1,4 \cdot a_w \cdot t^{1/4} \quad (5.14)$$

Donde:

a_w : Aceleración rms ponderada en frecuencia

t : Tiempo de exposición en segundos

El valor de eVDV para los valores superiores e inferiores de la zona dada por la ecuación A.2 en la figura 5.6 son 8,5 y 17, respectivamente.

5.1.2.2 Método de evaluación cuando el método básico no es suficiente.

Usualmente se admite que los efectos contra la salud están influenciados por los valores pico de la aceleración y que se subestiman los efectos cuando se utiliza solamente el valor de la aceleración rms.

Para vibraciones con factores de cresta inferiores a 9, normalmente es suficiente la utilización de la aceleración rms ponderada en frecuencia (véase 5.1.1.7).

Para algunos tipos de vibraciones, especialmente las que contienen choques ocasionales y cuyo factor de cresta es superior a 9, puede utilizarse el valor rms dinámico y el valor de la dosis de vibración a la cuarta potencia (véase 5.1.1.8).

Se reconoce que el factor de cresta es un método incierto de decidir si la aceleración rms puede usarse para evaluar la respuesta humana a la vibración. En caso de duda se recomienda utilizar el siguiente criterio:

Utilizar el MTVV si:

$$\frac{MTVV}{a_w} > 1,5 \quad (5.15)$$

Utilizar el VDV, si:

$$\frac{VDV}{a_w T^{\frac{1}{4}}} = 1,75 \quad (5.16)$$

5.2 PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN DE LOS TRABAJADORES FRENTE A LOS RIESGOS DERIVADOS DE LA EXPOSICIÓN A VIBRACIONES DE CUERPO COMPLETO

Siguiendo las directrices básicas de actuación impuestas por la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales, son tres los frentes de actuación que conducen a una prevención con éxito de los riesgos derivados de la exposición a VCC.

- Evaluación de los riesgos e implantación de medidas de control necesarias.
- Evaluación de la salud de los trabajadores expuestos.
- Formación e Información a los trabajadores expuestos.

5.2.1 EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS E IMPLANTACIÓN DE LAS MEDIDAS DE CONTROL NECESARIAS

En la Figura 5.7 se indica el procedimiento para la evaluación de los riesgos y la toma de decisión sobre la necesidad de medidas de control, en el caso de exposición a vibraciones de cuerpo completo.

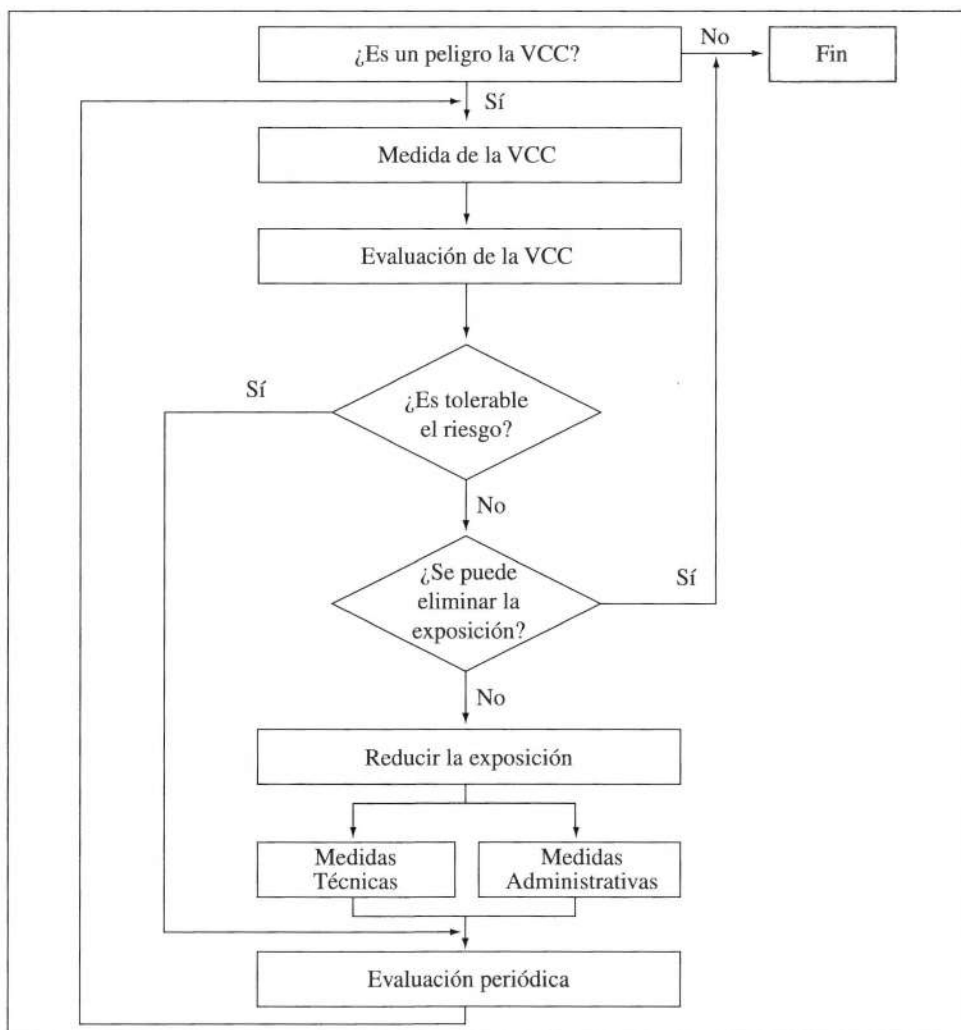


Fig. 5.7

5.2.1.1 Determinar si la VCC es un peligro.

Para las máquinas móviles, el apartado 3.6.3 del Anexo I del R.D. 1435/1992 de Máquinas, obliga al fabricante a declarar el valor de la aceleración rms ponderada en frecuencia a la que se vea expuesto el cuerpo (de pie o sentado), cuando exceda de $0,5 \text{ m/s}^2$. En el caso de que no exceda dicho valor, se deberá mencionar.

En una primera aproximación, con el valor declarado por el fabricante y conociendo el tiempo de exposición, se puede calcular, mediante la expresión 5.9, el valor de a_w para 8 horas.

Con el valor a_w hallado y mediante la gráfica de la Figura 5.6 se puede determinar en qué zona se encuentra la exposición: zona de daños probables, zona de precaución o zona en la que no se han documentado objetivamente efectos contra la salud.

Excepto en el caso de que la exposición se encuentre en esta última zona, de forma manifiestamente alejada de la zona de precaución (por ejemplo, la aceleración ponderada en frecuencia para 8 horas $A(8) < 0,25 \text{ m/s}^2$), se deberá realizar una medida de la vibración.

A título meramente indicativo, en la Figura 5.8 se dan los valores de aceleración equivalente (a_{eq}) en el puesto de conducción de vehículos industriales. Las medidas han sido determinadas según la norma AFNOR NF E 90-401-2, siendo:

$$a_{eq} = \max \{ a_{wx}, a_{wy}, a_{wz} \}$$

a_{wi} = aceleraciones rms ponderadas en los ejes x,y,z.

5.2.1.2 Medida de la vibración de cuerpo completo

La medida de la vibración debe hacerse siguiendo lo expuesto en el apartado 5.1.1 anterior.

En general, en los vehículos móviles predomina la aceleración en el eje vertical. En los vehículos tales como cargadoras, excavadoras, bulldozers y niveladoras, pueden existir importantes niveles de vibraciones horizontales debido a los esfuerzos efectuados por su órganos de trabajo.

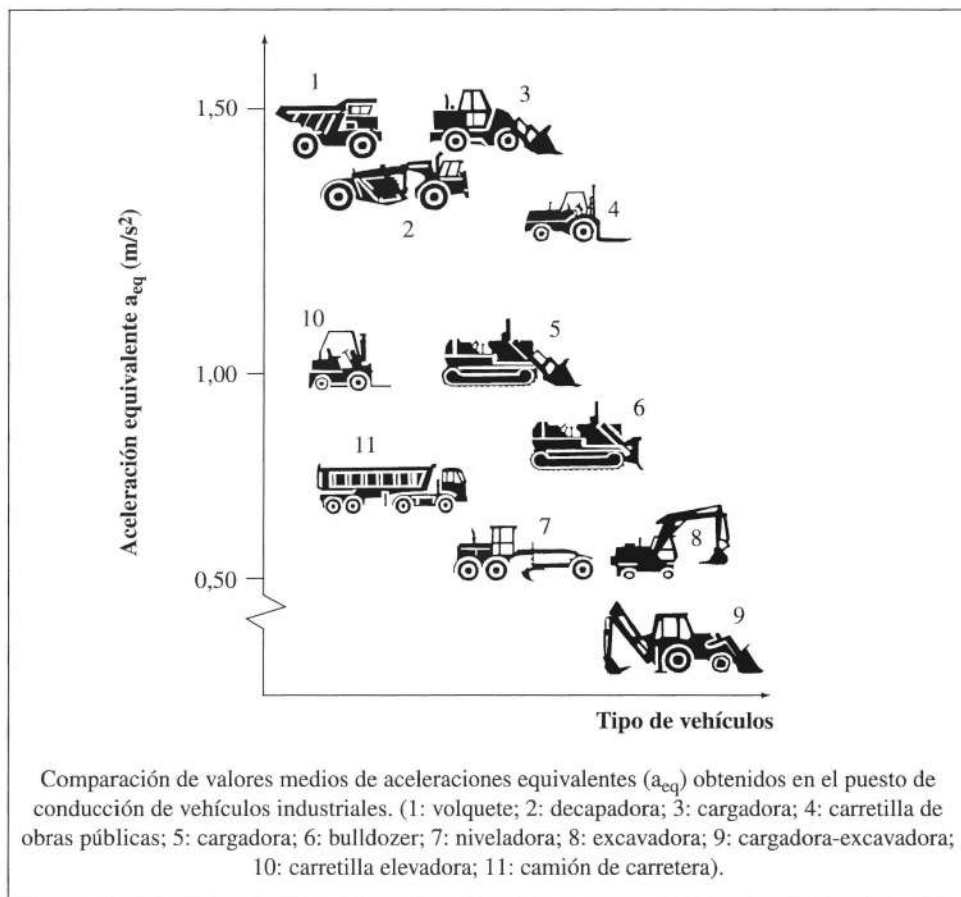


Fig. 5.8

5.2.1.3 Evaluación de la vibración de cuerpo completo.

Una vez determinado, mediante medida, el valor de la aceleración y conociendo el tiempo de exposición, hay que calcular, mediante las expresiones 5.9 ó 5.10 el valor de a_w para $T = 8$ horas.

Con el valor de a_w y mediante la gráfica de la Figura 5.6, se debe definir en qué zona se encuentra la exposición.

Sólo se calificarán de riesgo tolerable las exposiciones que se encuentren manifiestamente por debajo de la zona de precaución, por ejemplo aceleraciones ponderadas en frecuencia para 8 horas $A(8) < 0,25 \text{ m/s}^2$.

En el resto de los casos hay que tratar, en primer lugar, de eliminar la exposición y, si esto no es posible, de reducirla a valores tolerables.

5.2.1.4 Reducción de la exposición.

La exposición a la VCC se puede reducir de dos formas:

- Mediante medidas técnicas de control
- Mediante medidas administrativas

5.2.1.4.1 Reducción de la exposición mediante medidas técnicas de control.

En este apartado vamos a tratar de la reducción de la exposición a VCC en los conductores de camiones, carretillas elevadoras y maquinaria de obras públicas, por ser en estos puestos de trabajo en los que más se presentan los daños derivados de dicha exposición.

No se conoce con exactitud la población expuesta dentro del colectivo citado, pero en una encuesta realizada en Francia, se encontró que existen:

- 300.000 Vehículos transporte mayores de 9 Tm
- 200.000 Carretillas elevadoras
- 150.000 Maquinas de obra públicas.

Además, se calcula que en manutención mecánica de cargas hay entre tres y cuatro veces más conductores que vehículos.

La exposición de los conductores de dichos vehículos se compone de vibraciones de baja frecuencia por circulación sobre suelo irregular y por las tareas que desarrollan las máquinas que manejan. La exposición se agrava por condiciones de tra-

bajo que obligan a posturas incómodas, por asientos inadecuados y no regulables, así como por la obligación de permanecer sentado mucho tiempo sin cambiar de postura.

La reducción de la exposición a VCC mediante medidas técnicas de control implica tres actuaciones secuenciales:

- Reducción de las vibraciones en su origen.
- Disminución de la transmisión de las vibraciones a los conductores, intercalando dispositivos de suspensión entre el conductor y la fuente.
- Disminución del efecto de las vibraciones mejorando la postura de trabajo.

5.2.1.4.1.1. Reducción de las vibraciones en su origen.

Para la reducción de las vibraciones en su origen hay que adoptar una o varias de las siguientes medidas:

- Seleccionar correctamente el vehículo o máquina a emplear en función de la tarea a realizar y del terreno.
- Reducir las irregularidades del terreno por el que se desplazan los vehículos, por ejemplo, nivelando y fijando el terreno por el que circulan las máquinas de obras públicas y eliminando obstáculos en las zonas de circulación de carretillas tales como, umbrales de puertas, vías férreas, baches.
- Adaptar la velocidad de los vehículos a las condiciones del firme por el que circulan.
- Realizar un mantenimiento correcto de los vehículos.
- Diseñar procedimientos de trabajo que minimicen las vibraciones.
- Colocar correctamente la carga en los camiones para evitar excesivas vibraciones según el eje longitudinal.

5.2.1.4.1.2 Disminución de la transmisión de las vibraciones a los conductores intercalando dispositivos de suspensión entre el conductor y la fuente.

La transmisión de vibraciones al conductor puede reducirse colocando en diversos puntos elementos aislantes (Fig. 5.9).

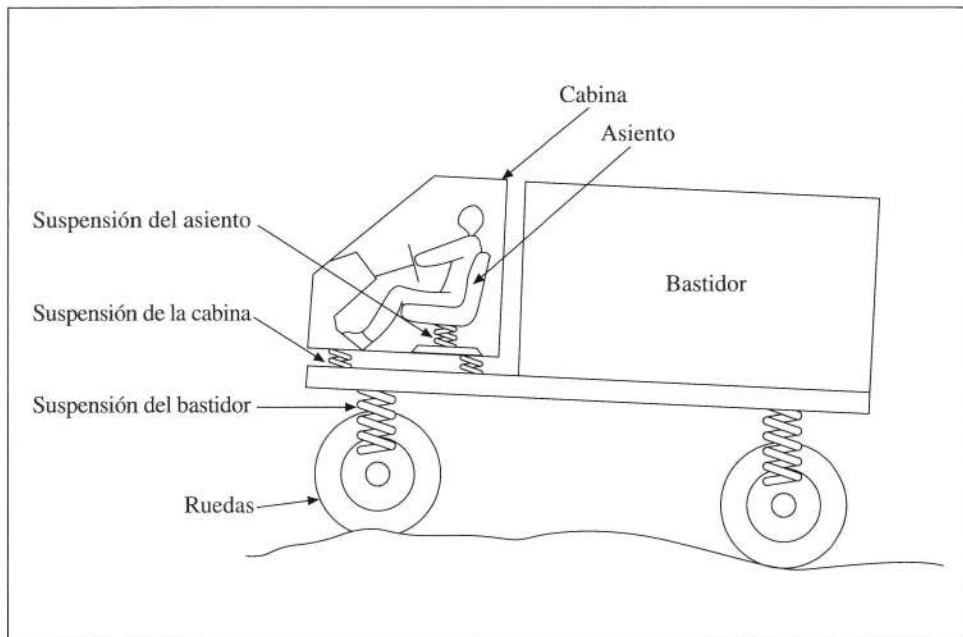


Fig. 5.9: Posibles situaciones de los sistemas de suspensión en un vehículo.

• Neumáticos

La función del neumático es filtrar las pequeñas irregularidades del suelo, pero pueden provocar movimientos de baja frecuencia tales como los de cabeceo en ciertos vehículos todo terreno.

En ciertos casos es preferible utilizar neumáticos más rígidos o rellenos por razones de estabilidad, carga, desgaste, y para evitar reventones en carretillas.

Los fabricantes de neumáticos disponen de diferentes soluciones como los neumáticos rellenos multicapa, cámaras de aire alveolares, etc.

• Suspensión del chasis

Contrariamente a lo que sucede en los camiones, la mayoría de los vehículos todo terreno (excepto algunos volquetes de fabricación reciente), los tractores agrícolas y las carretillas elevadoras no tienen suspensión en el chasis.

Normalmente en camiones se utiliza la suspensión semielíptica. Con objeto de conseguir un mejor control del rozamiento entre las hojas, este tipo de suspensión se va reemplazando cada vez más por suspensiones del tipo parabólica. También se utilizan cada día más las suspensiones neumáticas (Fig. 5.10).

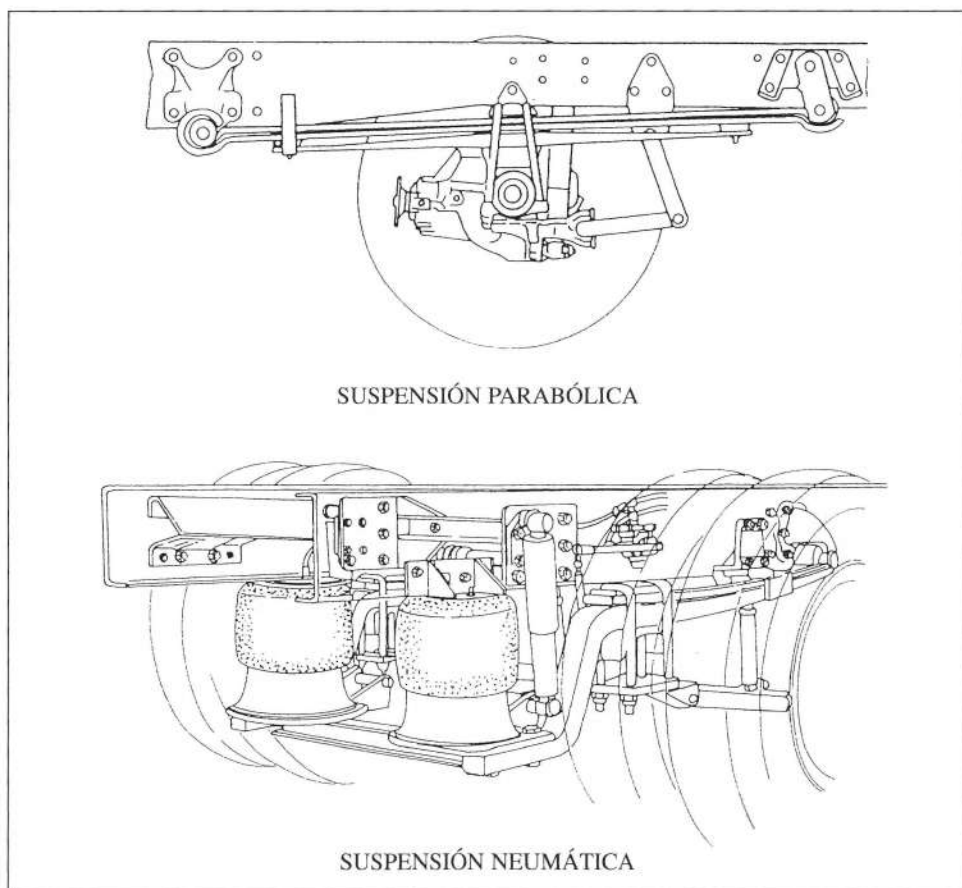


Fig. 5.10

• Suspensión de la cabina

En general existen dos formas de aislar la cabina del vehículo: mediante elementos de caucho o por suspensión mecánica de baja frecuencia en dos o cuatro puntos (Fig. 5.11). Sólo estas últimas son eficaces para reducir las vibraciones que llegan al conductor debidas a la circulación del vehículo.

En los últimos años, la mayoría de los fabricantes de camiones tractores y algunos de tractores agrícolas han adoptado las cabinas equipadas con suspensión mecánica en dos o cuatro puntos.

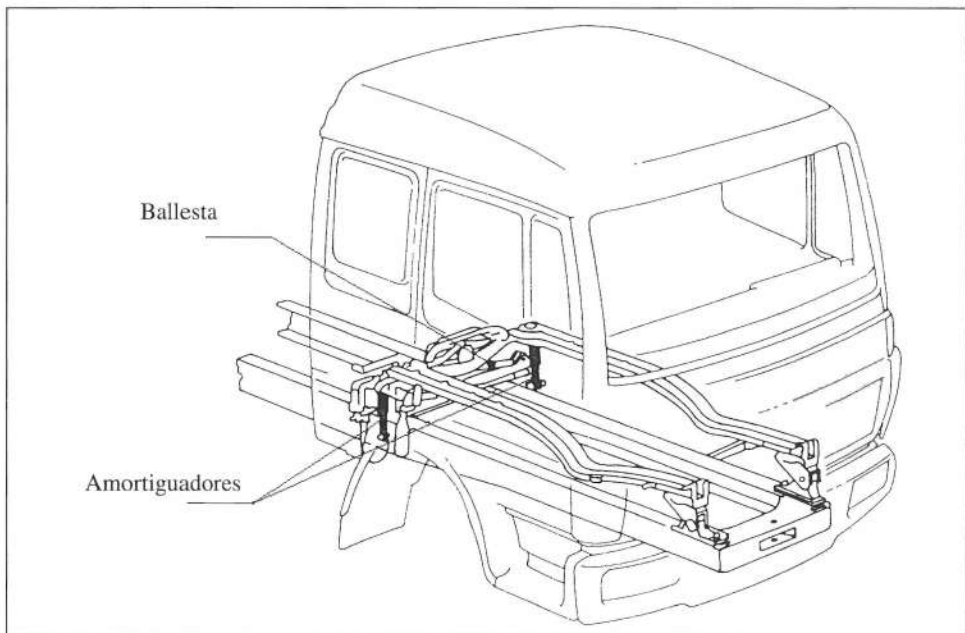


Fig. 5.11: Ejemplo de cabina suspendida para camión.

• Suspensión del asiento

La suspensión del asiento es la última solución que se dispone para reducir la transmisión de la vibración desde el vehículo al conductor. De hecho, en algunos tipos de vehículos, tales como las carretillas elevadoras con ruedas rígidas, es el único medio disponible.

La mayoría de los asientos con suspensión están diseñados para aislar de las vibraciones según el eje vertical. Algunos modelos tienen suspensión en el eje vertical y en el antero-posterior (camiones tractores y tractores agrícolas).

En estudios realizados en un gran número de vehículos, se ha observado que frecuentemente los asientos **amplifican las vibraciones en lugar de amortiguarlas**. En la figura 5.12 se indica la comparación entre los valores de las aceleraciones eficaces verticales medidas en el chasis y en el asiento.

Esto implica la necesidad de elegir el asiento en función de las características dinámicas del vehículo.

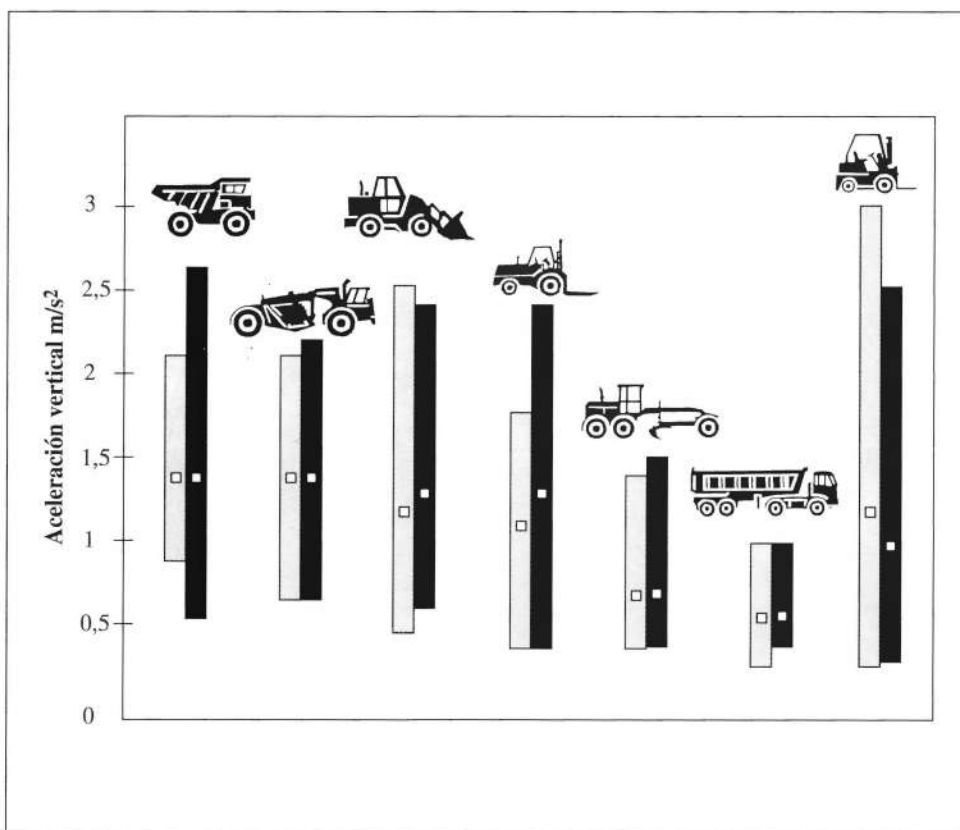


Fig. 5.12: Comparación de los valores eficaces de las aceleraciones verticales medidas sobre el chasis (color negro) y sobre el asiento (color gris).

Los siguientes parámetros son importantes para la selección de un asiento con suspensión:

- **Frecuencia de corte de la suspensión del asiento (f_c)**

La frecuencia dominante de vibración debe ser superior a la frecuencia de corte de la suspensión del asiento, es decir, el asiento atenúa si $f > f_c$ y amplifica si $f < f_c$.

En la figura 5.13 se dan las frecuencias dominantes según el eje vertical de diferentes vehículos industriales.

- **Amortiguación**

La amortiguación debe ser suficiente, por una parte, para evitar una amplificación excesiva cuando la frecuencia del movimiento es próxima a la frecuencia de resonancia del asiento y, por otra, para aminorar las sacudidas de la suspensión debidas a vibraciones transitorias.

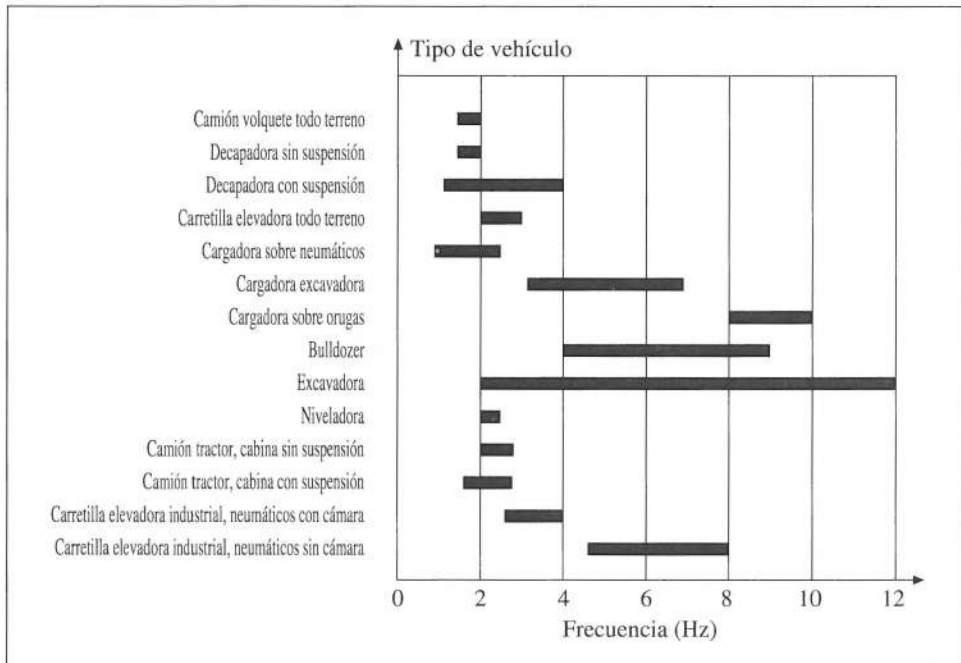


Fig. 5.13: Frecuencias dominantes del movimiento según el eje vertical para diferentes vehículos industriales.

- **Recorrido del asiento**

Cuanto menor es la frecuencia de las vibraciones que ha de amortiguar la suspensión del asiento, mayor tiene que ser el recorrido de la suspensión, por ejemplo: para 3 Hz, de 6 a 10 cm y para 2 Hz, unos 15 cm.

Cuando son necesarios recorridos muy grandes, se emplean complejos mecanismos cinemáticos para que el conductor pueda mantener el control de los pedales.

- **Reglaje del asiento**

La suspensión actúa correctamente sólo si el asiento se regula de acuerdo con el peso del conductor. Los asientos con suspensión neumática regulan automáticamente el peso del conductor.

- **Dimensiones**

La distancia mínima entre la base del asiento y la fijación a la carrocería debe ser del orden de 20 cm. En ciertas carretillas elevadoras de techo rebajado puede ser difícil instalar un asiento con suspensión tradicional. Puede recurrirse a un asiento compacto.

5.2.1.4.1.3 Disminución del efecto de las vibraciones mejorando la postura de trabajo.

Dado que el origen del dolor de espalda es probablemente una combinación de exposición a VCC y de posturas incorrectas, una persona soportará mejor el entorno vibratorio cuanto más adecuada sea su postura de trabajo.

El conductor ha de poder conducir con el tronco recto, sin golpearse con la cabeza en el techo y ha de poder introducir fácilmente las piernas entre el volante y el asiento.

El asiento debe ser suficientemente grande para permitir que el conductor se mueva. Ha de tener una ligera inclinación hacia atrás y ha de estar recubierto de material rugoso para impedir el deslizamiento hacia delante a causa de las sacudidas.

Respecto al respaldo, en camiones, la altura debe llegar hasta los hombros y disponer de reposa-cabezas. En otros vehículos en los que el conductor deberá girarse frecuentemente (marcha atrás, carga trasera), la altura no deberá pasar los omoplatos. En este último caso, se debe aligerar el esfuerzo postural mediante medios auxiliares de visualización, por ejemplo: retrovisores, cámaras de TV, etc.. El respaldo podrá estar ligeramente curvado para mantener al conductor.

En cuanto al material de relleno del asiento, no debe ser muy rígido, siempre más blando que la base del asiento con el fin de atenuar las vibraciones antero-posteriores.

Si es posible, el asiento deberá tener una regulación de la zona lumbar. También deberá poder regularse la distancia del asiento hasta el volante y su altura con respecto al suelo de la cabina, con el fin de respetar los ángulos de confort.

5.2.1.4.2 Reducción de la exposición mediante medidas administrativas.

La exposición a VCC se compone de dos términos: un valor de la aceleración y el tiempo de exposición. Tanto si utilizamos la expresión 5.9 como si utilizamos la 5.10 ó la 5.14, se puede ver que, para una misma exposición, el valor de la vibración puede ser tanto más alto cuanto menor es el tiempo de exposición.

Por lo tanto, una forma de mantener una exposición en un valor seguro es disminuir el tiempo de exposición mediante la rotación del personal.

Por ejemplo, el valor de $eVDV$ (5.14) para la línea inferior que separa la zona de precaución de la zona en la que no se han documentado objetivamente efectos contra la salud (Fig. 5.6) es 8,5.

Esto implica que la aceleración para un tiempo de exposición de 8 h es $0,466 \text{ m/s}^2$ y para un tiempo de exposición de 4h es $0,554 \text{ m/s}^2$, es decir, un 19% mayor.

5.2.1.5 Evaluación periódica.

La evaluación de la VCC es un proceso dinámico: es preciso realizar una evaluación siempre que cambien las condiciones de trabajo.

Por otra parte, hay que realizar una evaluación periódica con el fin de comprobar que las medidas de control siguen siendo adecuadas. La periodicidad dependerá del nivel de riesgo y de la garantía de buen funcionamiento de las medidas de control implantadas.

5.2.2 EVALUACIÓN DE LA SALUD DE LOS TRABAJADORES EXPUESTOS

Para los trabajadores expuestos a VCC, se debe establecer un programa de evaluación de la salud que comprenda:

- Un reconocimiento médico inicial compuesto de:
 - Historia de trabajos anteriores con especial referencia a exposiciones a VCC y a otros trabajos que hayan supuesto un riesgo de daños a la parte inferior de la columna.
 - Historia médica
 - Reconocimiento con especial referencia al sistema musculoesquelético.
- Reconocimientos periódicos, a intervalos regulares.

Por otra parte, se debe establecer un procedimiento para que los trabajadores expuestos a VCC puedan informar sobre posibles síntomas o daños.

Las siguientes condiciones físicas se considera que aumentan el riesgo derivado de la exposición a VCC: episodios repetidos de dolor en la parte baja de la espalda, cambios degenerativos prematuros de la columna vertebral, desórdenes en los discos intervertebrales, aumento de la rigidez de la columna vertebral, gastritis crónica y/o úlceras pépticas, embarazo. Todas esas condiciones se consideran contraindicadas para una trabajo con alta exposición a VCC.

5.2.3 FORMACIÓN E INFORMACIÓN A LOS TRABAJADORES EXPUESTOS

Los trabajadores han de estar informados acerca de los riesgos derivados de la exposición a VCC, así como de la forma de comunicar posibles síntomas o daños derivados de dicha exposición.

También deben recibir información sobre la forma de realizar el trabajo, la utilización correcta de los medios de control (por ejemplo utilización correcta de los asientos con suspensión) y las posturas de trabajo.

5.3 LEGISLACIÓN COMUNITARIA. PROPUESTA MODIFICADA DE DIRECTIVA DE AGENTES FÍSICOS

La Comisión de la Unión Europea ha elaborado una propuesta modificada de Directiva del Consejo sobre las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos.

La propuesta modificada ha sido publicada en el D.O.C.E. N° C230/3 del 19.8.94.

Entre los agentes físicos contemplados se encuentra la vibración de cuerpo completo y, para ella, se establece lo siguiente:

5.3.1 RIESGO

Se refiere al riesgo para la salud y la seguridad derivado de la exposición a vibración transmitida a todo el cuerpo; enfermedades lumbares y lesiones de la columna, así como fuertes molestias.

Como **indicador del riesgo** se utiliza la **exposición diaria a la vibración de todo el cuerpo A(8)**, determinada por:

$$(a_w)_{eq(8)} = A(8) = \left(\frac{1}{8} \int_0^T (a_w(t))^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.17)$$

Siendo a_w la suma vectorial (raíz cuadrada de la suma) dada por:

$$a_w = \sqrt{(1,4 \cdot a_{xw})^2 + (1,4 \cdot a_{yw})^2 + (a_{zw})^2} \quad (5.18)$$

Siendo a_{wx} , a_{wy} , a_{wz} las aceleraciones rms ponderadas en frecuencia en los ejes ortogonales x,y,z, tal como se establece en la norma ISO 2631. Se podrá considerar irrelevante cualquier término de la suma vectorial que sea inferior al 66% del más elevado.

5.3.2 VALORES

• **Nivel umbral = $A(8) = 0,25 \text{ m/s}^2$**

Es el valor de la exposición por debajo del cual la exposición continua o repetida carece de efectos negativos sobre la salud y seguridad de los trabajadores.

• **Nivel de acción = $A(8) = 0,5 \text{ m/s}^2$**

Es el valor a partir del cual se debe:

- Dar información a los trabajadores expuestos.
- Impartir formación sobre la aplicación de medidas de control.
- Proporcionar información sobre la vibración producida por los equipos en un período de referencia de 8 h.
- Establecer un programa de medidas técnicas y/u organizativas para reducir la exposición

Si la exposición a la vibración de cuerpo completo incluye sacudidas u otras vibraciones de gran magnitud en períodos breves, el nivel de acción correspondiente se fijará como el riesgo derivado de una exposición en un período de tiempo de una hora, con una amplitud constante de $1,25 \text{ m/s}^2$.

A la hora de aplicar estas disposiciones, se considerará que $A(8)$ es posible que alcance $0,5 \text{ m/s}^2$, cuando el equipo de trabajo utilizado transmita a todo el cuerpo una aceleración equivalente a corto plazo (unos pocos minutos) igual a dicho valor numérico.

- **Valor límite de exposición = $A(8) = 0,7 \text{ m/s}^2$**

Es el valor de exposición a partir del cual la persona no protegida corre riesgos inaceptables. Sobrepasar este valor está prohibido y debe evitarse mediante la aplicación de las disposiciones que se citan seguidamente.

5.3.3 ACTIVIDADES CON RIESGO INCREMENTADO

Cuando las actividades supongan una exposición igual o superior a $A(8) = 1,25 \text{ m/s}^2$, existe la obligación de declarar dichas actividades ante la autoridad competente. Los Estados miembros velarán para que se adopten las medidas apropiadas a fin de controlar el riesgo que resulta de estas actividades.

5.3.4 MEDICIÓN Y EVALUACIÓN

La medición y evaluación se programarán y efectuarán a intervalos apropiados. Estos intervalos se revisarán cuando haya motivos para pensar que no han sido correctos o que se ha producido una modificación material en el trabajo.

Los métodos utilizados podrán incluir un muestreo, que deberá ser representativo de la exposición del trabajador a las VCC.

Los métodos y el equipo utilizados deberán adaptarse, en particular, a la aceleración que se desea medir, a la duración de la exposición, a los factores ambientales y a las características del aparato de medición.

Tales métodos y equipos deberán permitir cuantificar la aceleración rms ponderada en frecuencia y decidir si, en el caso considerado, se superan los valores dados en 5.3.2. Para la aplicación del presente párrafo, se sumará al valor medido la incertidumbre de medición determinada, de conformidad con los procedimientos de la metrología.

Los datos obtenidos en la medida y evaluación se conservarán de manera que se puedan consultar posteriormente.

En los casos en que no pueda cuantificarse de manera fiable el nivel de vibración, deberá evaluarse la probabilidad de que se produzca una exposición superior al nivel de acción (observación de prácticas de trabajo, información de equipos, etc.) a fin de poder determinar los riesgos existentes. Si no puede descartarse que produzca una exposición superior al nivel de acción, deberán aplicarse las medidas preventivas correspondientes

5.3.5 REDUCCIÓN DEL RIESGO

Habida cuenta de los progresos de la técnica y de la disponibilidad de medidas de control de las VCC, prioritariamente en su origen, se deberán reducir los riesgos derivados de la exposición a dicho agente físico al nivel más bajo realizable, con el objetivo de situar la exposición a un nivel inferior al nivel umbral citado en 5.2.2.

La reducción de los riesgos se basará en los principios generales que se indican en el apartado 2 del artículo 6 de la Directiva Marco 89/391/CEE.

El empresario establecerá y aplicará un programa destinado a realizar la reducción de los riesgos, mediante medidas de naturaleza técnica y/o de organización del trabajo.

Mientras no se disponga de equipos de protección individual adecuados y prácticos, las disposiciones dirigidas a reducir la exposición se complementarán con medidas encaminadas a reducir el riesgo derivado de dicha exposición.

La Comisión y los Estados miembros garantizarán una aplicación coordinada y dinámica de las disposiciones de esta sección.

5.3.6 EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL

No se dispone en la actualidad de ningún equipo de protección individual adecuado contra la vibración de cuerpo completo.

5.3.7 INFORMACIÓN Y FORMACIÓN

La información y la formación a los trabajadores expuestos debe incluir, como mínimo:

- Cómo y por qué detectar y comunicar los signos de lesiones.
- Prácticas de trabajo seguras a fin de reducir a un mínimo la exposición a la VCC.
- Medidas para reducir el riesgo resultante

5.3.8 VIGILANCIA DE LA SALUD

Los trabajadores expuestos a una vibración de cuerpo completo que sobrepase $A(8) = 0,5 \text{ m/s}^2$, tendrán derecho a la vigilancia regular de la salud con objeto de facilitar la detección precoz de cualquier degradación de la salud debida a la VCC, y a exigir exámenes regulares.

5.3.9 EXTENSIÓN DE LA EXPOSICIÓN

Cuando un trabajador tenga derecho a la utilización de instalaciones de reposo supervisadas por el empresario, la vibración de todo el cuerpo en estas instalaciones deberá reducirse a un nivel compatible con la finalidad de las mismas y sus condiciones de utilización, excepto en los casos de fuerza mayor.

5.3.10 INTERFERENCIAS

Se limitará la vibración a valores inferiores a los establecidos en la presente Directiva, cuando dicha vibración interfiera en la adecuada manipulación de controles o en la lectura de indicadores.

5.3.11 RIESGOS INDIRECTOS

Cuando la vibración implique para los trabajadores un riesgo que no se derive de su exposición a ella, deberá controlarse dicho riesgo. En particular, en los casos en que la vibración interfiera en la estabilidad de las estructuras o en la adecuada sujeción de las juntas.

CAPÍTULO 6

LA NORMATIVA SOBRE VIBRACIONES

6.0 INTRODUCCIÓN

Se entiende como Normativa sobre vibraciones al conjunto de **DISPOSICIONES, NORMAS O RECOMENDACIONES** relacionadas con la protección (directa o indirecta) de los trabajadores frente a los riesgos derivados de la exposición a vibraciones.

DISPOSICIÓN.- Es cualquier Reglamento, Directiva, Ley, Real Decreto o Disposición administrativa, aprobados por la **Autoridad competente** y con **carácter vinculante**.

NORMA.- Es cualquier especificación técnica aprobada por un **Organismo Normalizador** y **sin carácter vinculante**.

RECOMENDACIÓN.- Es cualquier especificación técnica aprobada por una **Entidad de prestigio** y **sin carácter vinculante**.

6.1 DISPOSICIONES SOBRE VIBRACIONES

Las disposiciones las podemos dividir en dos grandes grupos:

- Sobre exposición a vibraciones.
- Sobre emisión de vibraciones.

Emisión de vibraciones es la generación de vibraciones por parte de una máquina. La emisión depende del tipo de máquina, de unas determinadas condiciones de servicio y es independiente de la duración de funcionamiento.

Exposición a vibraciones es el impacto de las vibraciones sobre los seres humanos. Depende de las personas situadas en un puesto de trabajo, del funcionamiento real de la máquina y del tiempo de exposición.

En la Unión Europea, la exposición a vibraciones está regulada por Directivas derivadas del Artículo 118A del Tratado y la emisión de vibraciones por Directivas derivadas del Artículo 100A.

6.2 DISPOSICIONES SOBRE EXPOSICIÓN A VIBRACIONES

6.2.1 LEY DE PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES

La Ley 31/1995 de 8 de noviembre (BOE N° 269 de 10.11.95) traspone a la legislación española, entre otras, la Directiva Marco 89/391/CEE. En su Capítulo III, la Ley regula el conjunto de derechos y obligaciones derivados o correlativos del derecho básico de los trabajadores a su protección, así como, de manera más específica, las actuaciones a desarrollar en situaciones de emergencia o en caso de riesgo grave o inminente, las garantías y los derechos relacionados con la vigilancia de la salud.

En especial, es importante destacar los siguientes artículos:

Artículo 14. Derecho a la protección frente a los riesgos laborales.

1. Los trabajadores tienen derecho a una protección eficaz en materia de seguridad y salud en el trabajo.

El citado derecho supone la existencia de un correlativo deber del empresario de protección de los trabajadores frente a los riesgos laborales.

/.../

2. En cumplimiento del deber de protección, el empresario deberá garantizar la seguridad y la salud de los trabajadores a su servicio en todos los aspectos relacionados con el trabajo.

/.../

Artículo 15. Principios de la acción preventiva.

1. El empresario aplicará las medidas que integran el deber general de prevención previsto en el artículo anterior, con arreglo a los siguientes principios generales:

- a) Evitar los riesgos.
- b) Evaluar los riesgos que no se puedan evitar.
- c) Combatir los riesgos en su origen.
- d) Adaptar el trabajo a la persona, en particular en lo que respecta a la concepción de los puestos de trabajo, así como a la elección de los equipos y los métodos de trabajo y de producción, con miras, en particular, a atenuar el trabajo monótono y repetitivo y reducir los efectos del mismo en la salud.
- e) Tener en cuenta la evolución de la técnica.
- f) Sustituir lo peligroso por lo que entrañe poco o ningún peligro.
- g) Planificar la prevención, buscando un conjunto coherente que integre en ella la técnica, la organización del trabajo, las condiciones de trabajo, las relaciones sociales y la influencia de los factores ambientales en el trabajo.
- h) Adoptar medidas que antepongan la protección colectiva a la individual.
- i) Dar las debidas instrucciones a los trabajadores.

/.../

Artículo 16. Evaluación de los riesgos.

1. La acción preventiva en la empresa se planificará por el empresario a partir de una evaluación inicial de los riesgos para la seguridad y la salud de los trabajadores, que se realizará, con carácter general, teniendo en cuenta la naturaleza de la actividad, y en relación con aquellos que estén expuestos a riesgos especiales. Igual evaluación deberá hacerse con ocasión de la elección de los equipos de trabajo, de las sustancias o preparados químicos y del acondicionamiento de los lugares de trabajo. La evaluación inicial tendrá en cuenta aquellas otras actuaciones que deban desarrollarse de conformidad con lo dispuesto en la normativa sobre protección de riesgos específicos y actividades de especial peli-

grosidad. La evaluación será actualizada cuando cambien las condiciones de trabajo y, en todo caso, se someterá a consideración y se revisará, si fuera necesario, con ocasión de los daños para la salud que se hayan producido.

Cuando el resultado de la evaluación lo hiciera necesario, el empresario realizará controles periódicos de las condiciones de trabajo y de la actividad de los trabajadores en la prestación de sus servicios para detectar situaciones potencialmente peligrosas.

/.../

Artículo 17. Equipos de trabajo y medios de protección.

1. El empresario adoptará las medidas necesarias con el fin de que los equipos de trabajo sean adecuados para el trabajo que deba realizarse y convenientemente adaptados a tal efecto, de forma que garanticen la seguridad y la salud de los trabajadores al utilizarlos.

Cuando la utilización de un equipo de trabajo pueda presentar un riesgo específico para la seguridad y la salud de los trabajadores, el empresario adoptará las medidas necesarias con el fin de que:

- a) La utilización del equipo de trabajo quede reservada a los encargados de dicha actualización.
- b) Los trabajos de reparación, transformación, mantenimiento o conservación sean realizados por los trabajadores específicamente capacitados para ello.

/.../

Artículo 18. Información, consulta y participación de los trabajadores.

1. A fin de dar cumplimiento al deber de protección establecido en la presente Ley, el empresario adoptará las medidas adecuadas para que los trabajadores reciban todas las informaciones necesarias en relación con:

- a) Los riesgos para la seguridad y la salud de los trabajadores en el trabajo, tanto aquellos que afecten a la empresa en su conjunto como a cada tipo de puesto de trabajo o función.
- b) Las medidas y actividades de protección y prevención aplicables a los riesgos señalados en el apartado anterior.
- c) Las medidas adoptadas de conformidad con lo dispuesto en el artículo 20 de la presente Ley.

En las empresas que cuenten con representantes de los trabajadores, la información a que se refiere el presente apartado se facilitará por el empresario a los trabajadores a través de dichos representantes; no obstante, deberá informarse directamente a cada trabajador de los riesgos específicos que afecten a su puesto de trabajo o función y de las medidas de protección y prevención aplicables a dichos riesgos.

/... /

Artículo 19. Formación de los trabajadores.

1. En cumplimiento del deber de protección, el empresario deberá garantizar que cada trabajador reciba una formación teórica o práctica, suficiente y adecuada, en materia preventiva, tanto en el momento de su contratación, cualquiera que sea la modalidad o duración de ésta, como cuando se produzcan cambios en las funciones que desempeñe o se introduzcan nuevas tecnologías o cambios en los equipos de trabajo.

La formación deberá estar centrada específicamente en el puesto de trabajo o función de cada trabajador, adaptarse a la evolución de los riesgos y a la aparición de otros nuevos y repetirse periódicamente, si fuera necesario.

/... /

Artículo 22. Vigilancia de la salud.

1. El empresario garantizará a los trabajadores a su servicio la vigilancia periódica de su estado de salud en función de los riesgos inherentes al trabajo.

Esta vigilancia sólo podrá llevarse a cabo cuando el trabajador preste su consentimiento. De este carácter voluntario sólo se exceptuarán, previo informe de los representantes de los trabajadores, los supuestos en los que la realización de los reconocimientos sea imprescindible para evaluar los efectos de las condiciones de trabajo sobre la salud de los trabajadores o para verificar si el estado de salud del trabajador puede constituir un peligro para el mismo, para los demás trabajadores o para otras personas relacionadas con la empresa o cuando así esté establecido en una disposición legal en relación con la protección de riesgos específicos y actividades de especial peligrosidad.

En todo caso se deberá optar por la realización de aquellos reconocimientos o pruebas que causen las menores molestias al trabajador y que sean proporcionales al riesgo.

2. Las medidas de vigilancia y control de la salud de los trabajadores se llevarán a cabo respetando siempre el derecho a la intimidad y a la dignidad de la persona del trabajador y la confidencialidad de toda la información relacionada con su estado de salud.

- /... /

Artículo 23. Documentación.

1. El empresario deberá elaborar y conservar a disposición de la autoridad laboral la siguiente documentación relativa a las obligaciones establecidas en los artículos anteriores:
 - a) Evaluación de los riesgos para la seguridad y la salud en el trabajo, y planificación de la acción preventiva, conforme a lo previsto en el artículo 16 de la presente Ley.
 - b) Medidas de protección y de prevención a adoptar y, en su caso, material de protección que deba utilizarse.
 - c) Resultado de los controles periódicos de las condiciones de trabajo y de la actividad de los trabajadores, de acuerdo con lo dispuesto en el tercer párrafo del apartado 1 del artículo 16 de la presente Ley.

- d) Práctica de los controles del estado de salud de los trabajadores previstos en el artículo 22 de esta Ley y conclusiones obtenidas de los mismo en los términos recogidos en el último párrafo del apartado 4 del citado artículo.
- e) Relación de accidentes de trabajo y enfermedades profesionales que hayan causado al trabajador una incapacidad laboral superior a un día de trabajo. En estos casos el empresario realizará, además, la notificación a que se refiere el apartado 3 del presente artículo.

/.../

6.2.2 PROPUESTA DE DIRECTIVA DE AGENTES FÍSICOS

La Unión Europea tiene un proyecto para regular la exposición de los trabajadores a diversos agentes físicos, entre los que se encuentran las vibraciones.

Para ello, en el DOCE N° C 230/3 de 19.8.94 la Comisión ha publicado una propuesta modificada de Directiva del Consejo sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos.

Ésta sería una Directiva específica con arreglo al Artículo 16 de la Directiva Marco 89/391/CEE

Las disposiciones establecidas para vibración mano-brazo se encuentran descritas en el apartado 4.6 del capítulo 4º y para cuerpo completo, en el apartado 5.3 del capítulo 5º.

6.3 DISPOSICIONES SOBRE EMISIÓN DE VIBRACIONES

6.3.1 REGLAMENTO DE MÁQUINAS 1435/1992

El Reglamento de Máquinas 1435/1992 de 27 de Noviembre, publicado en el BOE del 11.12.92, traspone al derecho interno español la Directiva máquinas 89/392/CEE y su primera modificación, la Directiva 91/368/CEE.

La Directiva Máquinas ha tenido una segunda modificación mediante la Directiva 93/44/CEE, con el fin de incluir determinados equipos de elevación de personas (excluye los ascensores que disponen de Directiva propia) y a componentes de seguridad que se pongan en el mercado por separado. Esta Directiva no ha sido aún traspuesta a la legislación española.

Se aplica a máquinas en general, exceptuando las que son objeto de Directivas específicas, por ejemplo: ascensores, vehículos a motor, funiculares, tractores, aparatos a presión, etc..

La Directiva Máquinas es un ejemplo típico de las directivas de “Nuevo Enfoque”. Estas Directivas se basan en los principios fundamentales siguientes:

- Las Directivas contienen **requisitos esenciales de seguridad (RES)**.
- Las **Normas Armonizadas** dan especificaciones técnicas que permiten fabricar productos conformes con los RES establecidos en las Directivas.
- Las especificaciones técnicas de las Normas Armonizadas **no son obligatorias**; aplicarlas es un medio de satisfacer los requisitos esenciales correspondientes.
- Un producto que cumpla las especificaciones de una Norma Armonizada, cuya referencia haya sido publicada en el DOCE, se **presume conforme con los RES** establecidos en las Directivas.

Normalmente una Directiva de “Nuevo Enfoque” se aplica a una amplia gama de productos, establece los RES y fija los procedimientos de declaración CE de conformidad. El fabricante, o su representante en la CE, debe **garantizar que el producto es conforme con la o las Directivas aplicables**. También es responsabilidad del fabricante determinar cómo diseñar/construir sus productos para garantizar que son conformes con los RES establecidos en la Directiva.

6.3.1.1 Requisitos esenciales de seguridad (RES) sobre vibraciones establecidos en la Directiva Máquinas.

a) Observaciones preliminares del ANEXO I:

- 1.- Las obligaciones establecidas por los requisitos esenciales de seguridad y de salud sólo se aplicarán cuando la máquina de que se trate, utilizada en las

condiciones previstas por el fabricante, presente el correspondiente peligro. En todo caso, los requisitos 1.1.2 (principios generales de integración de la seguridad), 1.7.3. (marcado) y 1.7.4 (manual de instrucciones) se aplicarán a **todas las máquinas incluidas en la presente directiva**.

- 2.- Los requisitos esenciales de seguridad y de salud enunciados en la presente directiva son **imperativos**. No obstante, cabe la posibilidad de que, habida cuenta del estado de la técnica, no se alcancen los objetivos que dichos requisitos establecen. En tal caso, y dentro de lo posible, la máquina deberá diseñarse y fabricarse para acercarse a dichos objetivos.

b) Anexo I, apartado 1.1.2.:

- /... /
- (b) Al optar por las soluciones más adecuadas, el fabricante aplicará los siguientes principios, en el orden que se indica:
 - Eliminar o reducir los riesgos en la medida de lo posible (integración de la seguridad en el diseño y fabricación de la máquina);
 - Adoptar las medidas de protección que sean necesarias frente a los riesgos que no puedan eliminarse;
 - Informar a los usuarios de los riesgos residuales debidos a la incompleta eficacia de las medidas de protección adoptadas, indicar si se requiere una formación especial y señalar si es necesario un EPI.
- (c) Al diseñar y fabricar la máquina y al redactar las instrucciones, el fabricante deberá prever no solamente un uso normal de la máquina, sino también el uso que de la máquina pueda esperarse de forma razonable.

Cuando el empleo anormal de la máquina entrañe un riesgo, ésta deberá estar diseñada para evitar que se utilice de manera anormal. En su caso, en las instrucciones de empleo deberán señalarse al usuario las contraindicaciones de empleo de la máquina que, según la experiencia, pudieran presentarse.

Por lo tanto, se puede ver que el Anexo I requiere **dos criterios separados para tratar los RES relacionados con las vibraciones**:

- (1) La eliminación o reducción de los riesgos, de acuerdo con el estado de la técnica y como requieren las observaciones preliminares y el RES de Anexo I, apartado 1.1.2.
- (2) La necesidad de dar información, según requiere, la observación preliminar y los RES 1.1.2 y 1.7.3 ambos obligatorios y otros varios RES que suplementan la información y el marcado, pero que no son obligatorios.

c) RES que tratan sobre la reducción de los riesgos

– Anexo I, apartado 1.5.9 Vibraciones

La máquina estará diseñada y fabricada para que los riesgos que resulten de las vibraciones que ella produzca se reduzcan al más bajo nivel posible, teniendo en cuenta el progreso técnico y la disponibilidad de medios de reducción de las vibraciones, especialmente en su fuente.

– Anexo I, apartado 3.2.2. Asientos

... El asiento deberá diseñarse de tal manera que reduzca al mínimo razonablemente posible las vibraciones que se transmitan al conductor....

– Anexo I, apartado 1.7.4. Manual de instrucciones

- d) En cuanto a los aspectos de seguridad, la reseña comercial que sirva de presentación de la máquina no deberá contradecirse con las instrucciones; mencionará las informaciones relativas a la emisión de ruido aéreo a que hace referencia el punto f) a continuación y, para las máquinas portátiles y/o guiadas a mano, las informaciones relativas a las vibraciones a que hace referencia el punto 2.2.

– **Anexo I, apartado 2.2. Máquinas portátiles y máquinas guiadas a mano.**

Manual de instrucciones

En las instrucciones se indicará lo siguiente sobre las vibraciones que emitan las máquinas portátiles y las máquinas guiadas a mano:

El valor cuadrático medio ponderado en frecuencia de aceleración a la que se vean expuestos los miembros superiores, cuando exceda de $2,5 \text{ m/s}^2$, definida por la normas de prueba adecuadas. Cuando la aceleración no exceda de $2,5 \text{ m/s}^2$, se deberá mencionar este particular.

A falta de normas aplicables, el fabricante indicará los métodos de medición utilizados y en qué condiciones se realizaron las mediciones.

– **Anexo I, apartado 3. Máquinas móviles**

Manual de instrucciones

El manual de instrucciones deberá incluir, junto con las indicaciones mínimas previstas en el punto 1.7.4, las indicaciones siguientes:

- a) Sobre las vibraciones generadas por la máquina, bien el valor real, bien un valor establecido a partir de la medida efectuada en una máquina idéntica:

El valor cuadrático medio ponderado en frecuencia de la aceleración a la que se vean expuestos los miembros superiores, cuando exceda de $2,5 \text{ m/s}^2$, cuando la aceleración no exceda de $2,5 \text{ m/s}^2$, se deberá mencionar este particular.

El valor cuadrático medio ponderado en frecuencia de la aceleración a la que se vea expuesto el cuerpo (en pie o asiento), cuando exceda de $0,5 \text{ m/s}^2$, cuando la aceleración no exceda de $0,5 \text{ m/s}^2$, se deberá mencionar este particular.

Cuando no se apliquen las normas armonizadas, los datos relativos a las vibraciones deberán medirse utilizando el código de medición más apropiado que se adapte a la máquina.

El fabricante indicará las condiciones de funcionamiento de la máquina durante las mediciones y los métodos utilizados para dichas mediciones.

6.4 NORMAS DE APOYO PARA TRATAR LAS VIBRACIONES EN LA DIRECTIVA MÁQUINAS

6.4.1 ORGANISMOS DE NORMALIZACIÓN INTERNACIONALES, EUROPEOS Y NACIONALES

6.4.1.1 Normalización internacional.

El objetivo de la **Organización Internacional de Normalización (ISO)** es la elaboración de normas internacionales (**Normas ISO**) con el fin de conciliar los puntos de vista e intereses de fabricantes, usuarios, gobiernos, etc.

Los miembros de ISO son los organismos de normalización más representativos de los distintos países. Actualmente cuenta con 73 miembros.

Los trabajos técnicos de normalización se desarrollan dentro de los Comités Técnicos (TC's). El comité encargado de la **normalización de vibraciones y choques es el TC 108**.

La Secretaría del TC 108 la tiene ANSI.

Dentro de cada Comité Técnico existen distintos subcomités (SC's), especializados en una rama de la disciplina en cuestión. Actualmente existen los seis subcomités siguientes:

SC	DENOMINACIÓN	SECRETARÍA
SC1	Equilibrado, incluyendo máquinas para equilibrado	ANSI
SC2	Medida y evaluación de la vibración mecánica en cuanto a su aplicación a máquinas, vehículos y estructuras	DIN
SC3	Uso y calibrado de instrumentos de medida de vibraciones	DS
SC4	Exposición humana a las vibraciones	DIN
SC5	Condiciones de comprobación y análisis de máquinas	ANSI
SC6	Sistemas generadores de vibraciones y choques	GOST R

6.4.1.2 Normalización europea.

El **Comité Europeo de Normalización (CEN)** es el Organismo Normalizador de la Unión Europea y de la EFTA.

Los trabajos técnicos de Normalización también se encargan a Comités Técnicos (TC's).

El Comité Técnico encargado de vibraciones mecánicas y choques es el TC 231.

La Secretaría del Comité la tiene DIN. El Comité está compuesto por los nueve grupos de trabajo (WG's) siguientes:

WG	DENOMINACIÓN	Líder del Grupo
WG1	Vibración cuerpo completo	K. Spang Suecia
WG2	Vibración mano-brazo	P. Donati Francia
WG3	Guantes antivibración y materiales resilientes	B. Hohmann Suiza
WG4	Instrumentación de medida	
WG5	Efectos de las vibraciones	M. Bovenzi Italia
WG6	Verificación y declaración	J Olofsson Suecia
WG7	Guías para códigos de ensayo	M. Majourel Francia
WG8	Guías para cláusulas de vibración	J. Gybel Jensen Dinamarca
WG9	Asientos	R. Stayner Reino Unido

6.4.1.3 Normalización nacional.

La **Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR)** es el Organismo Normalizador Español.

AENOR es miembro de ISO y de CEN.

La normalización en vibraciones recae en el Grupo de Trabajo 6 (GT6), perteneciente al Subcomité 5 (SC5) del Comité Técnico 81 (CTN-81): Prevención y medios de protección personal y colectiva en el trabajo.

SC	DENOMINACIÓN
SC1	Medios de protección individual
SC2	Medios de protección colectiva
SC3	Seguridad de las máquinas
SC4	Evaluación riesgos por agente químicos
SC5	Ergonomía <ul style="list-style-type: none"> • GT1: Principios ergonómicos • GT2: Antropometría y biomecánica • GT3: Aspectos ergonómicos PVD • GT4: Símbolos, señales y controles • GT5: Ambiente físico • GT6: Vibraciones

6.4.1.4 Tipos de normas.

- **Normas tipo A.**– Son normas de seguridad fundamentales. Establecen nociones fundamentales, principios para el diseño y aspectos generales que pueden ser aplicados a todos los tipos de máquinas.

Ejemplo: EN 292-1 - Seguridad de las máquinas. Conceptos básicos, principios generales para el diseño.

- **Normas tipo B.**- Son normas de seguridad relativas a una materia. Tratan de un aspecto de seguridad o de un tipo de dispositivo que condiciona la seguridad y son válidas para una amplia gama de máquinas:
- **Normas tipo B1.**- Tratan de aspectos particulares de seguridad, por ejemplo, distancias de seguridad, temperatura superficial, ruido.

Ejemplo: EN 294: Seguridad de las máquinas. Distancias de seguridad para impedir que se alcancen zonas peligrosas con los miembros superiores.

- **Normas tipo B2.**- Tratan de sistemas, dispositivos o componentes que condicionan la seguridad, por ejemplo, mandos a dos manos, dispositivos de enclavamiento, dispositivos sensibles a la presión, resguardos.

Ejemplo: EN 953: Seguridad de las máquinas - Resguardos - Requisitos generales para el diseño y construcción de resguardos fijos y móviles.

- **Normas de tipo C.**- Son normas de seguridad para tipos o familias de máquinas. Dan prescripciones detalladas de seguridad para una máquina particular o para un grupo de máquinas.

Ejemplo: prEN 1553. Norma C para maquinaria agrícola y forestal.

Como regla general es conveniente que las normas A y B aporten un valor añadido (disposiciones más específicas y/o más detalladas) con relación a los requisitos esenciales de las directivas y que las normas C aporten un valor añadido con relación a las especificados enunciadas en las normas A y B y, por tanto, con relación a los requisitos esenciales.

6.5 UTILIZACIÓN DE LAS NORMAS A LA HORA DE FABRICAR UNA MÁQUINA QUE GENERE VIBRACIONES Y QUE TENGA QUE CUMPLIR LO ESTABLECIDO EN EL REGLAMENTO DE MÁQUINAS

Supongamos que un fabricante ha de diseñar y fabricar una herramienta mecánica portátil de mano que genere vibraciones, por ejemplo un burilador, una llave de impactos, una lijadora, etc.

Si el fabricante desea vender la máquina en la Unión Europea, ha de cumplir los requisitos esenciales de seguridad exigidos en el R.D. 1435/1992 de máquinas, citados en el apartado 6.3.1 anterior.

Dado que los requisitos de seguridad son demasiado genéricos, es preferible utilizar las especificaciones de una norma armonizada. Ya se ha dicho anteriormente que un producto que cumpla las especificaciones de una norma armonizada, cuya referencia haya sido publicada en el DOCE, se presume conforme con los requisitos esenciales de seguridad establecidos en la Directiva.

Por lo tanto, el primer paso sería buscar una norma C de seguridad para la máquina o familia de máquinas de que se trate (Norma armonizada).

La Norma C facilita al fabricante la información necesaria y los pasos que ha de seguir para que la máquina cumpla los RES establecidos en el R.D.

En primer lugar, si la vibración es reconocida como peligro en este tipo de máquinas, estará relacionada en la lista de peligros.

La norma contendrá un artículo dedicado a la reducción de la vibración como requisito de seguridad. Recordemos que el RES del Anexo I apartado 1.5.9 del R.D. 1435/92 de máquinas obliga al fabricante a diseñar y fabricar la máquina para que los riesgos que resulten de las vibraciones que ella produzca se reduzcan al más bajo nivel posible, teniendo en cuenta el progreso técnico y la disponibilidad de medios de reducción de las vibraciones, especialmente en su fuente.

En este artículo se dará una descripción de las fuentes más importantes generadoras de vibraciones para la máquina o familia de máquinas. En algunos casos, y seguramente en un anexo informativo de la norma, se dará una lista de medidas técnicas para reducir las vibraciones en la fuente. El fabricante ha de considerar que la lista no es exhaustiva y, por lo tanto, puede utilizar métodos alternativos que igualen o mejoren la reducción de vibraciones.

Como información adicional, también puede utilizar el informe técnico CR 1030-1:1995 Vibración mano-brazo. Guía para la reducción de los peligros de las vibraciones. Parte 1: Métodos técnicos en el diseño de la máquina.

Si no es posible reducir la vibración en la fuente, en este artículo se indicarán medios para reducir las vibraciones mediante medidas de protección: aisladores de vibraciones, masas adicionales, masas resonantes, fundaciones especiales, asientos con suspensión, etc.

Para algunos tipos de máquinas puede suceder que, después de considerar todas las medidas de reducción posibles, tanto en la fuente, como en su camino de transmisión, el nivel de vibración sea tan elevado que sea preciso proteger al trabajador. Un método aplicable en algunos tipos de máquinas sería limitar el tiempo de exposición. En este caso, el fabricante ha de dar tal información en el manual de instrucciones y en la literatura técnica de la máquina.

También, la norma contendrá un artículo sobre la verificación de los requisitos de seguridad y sobre las medidas.

En la primera parte de este artículo, el fabricante puede obtener información sobre cómo medir la emisión de vibraciones de su máquina, cómo declarar los valores medidos así como puede verificar tales valores.

La norma le indicará un Código de ensayo de vibraciones específico con el que deberá medir la emisión de su máquina. Este código puede ser una norma independiente o un anexo de la norma C de Seguridad.

Cuando no exista un código de ensayo de vibraciones, la norma obligará a que el fabricante indique:

- Montaje y operación de la máquina durante el ensayo de vibraciones, incluyendo, si procede, una descripción de la pista de ensayo.
- Posición de los acelerómetros.
- Método de medida de vibraciones utilizado.
- Criterio de declaración de emisión de vibraciones utilizado

La norma también indicará al fabricante que, para realizar la declaración y verificación de los niveles de emisión de vibraciones, deberá utilizar la Norma prEN 12096: Vibración mecánica. Declaración y verificación de los niveles de emisión.

En la segunda parte del artículo, la norma facilitará medios para que el fabricante o cualquier otro interesado pueda verificar que se han alcanzado con éxito las medidas de reducción de vibraciones.

En general la norma contendrá unos valores alcanzables de emisión para la máquina o familia de máquinas. El fabricante deberá comprobar que los niveles de emisión de su máquina son iguales o inferiores a los valores alcanzables citados en la norma.

Los valores alcanzables que se indican en la norma pueden haber sido determinados por el Comité Técnico que ha elaborado la norma C de Seguridad, por Organismos Oficiales, etc.

En general los valores alcanzables se determinan analizando un numeroso grupo de valores de emisión medidos en los tipos de máquinas que están en el mercado, según los códigos de ensayo correspondientes y aplicando la norma EN 31689:1993 Acústica: Colección sistemática y comparación de los valores de emisión de ruido de maquinaria y equipo.

Actualmente existen pocos datos disponibles para obtener los valores alcanzables por lo que la mayoría de las Normas C de Seguridad no los facilitarán. Se espera que en un futuro, cuando existan más códigos de ensayo disponibles y la colección de datos se haga más extensiva, se puedan dar los valores alcanzables en futuras revisiones de las Normas C de Seguridad.

De todos modos, la ausencia de códigos de ensayo de vibraciones y de valores alcanzables no debe impedir que el fabricante obtenga la máxima reducción en la emisión de vibraciones de su máquina.

Por último la norma contendrá un artículo para indicar al fabricante el contenido del libro de instrucciones y de la literatura técnica de la máquina. En general, ambos documentos deberán contener la siguiente información sobre vibraciones:

- Los valores declarados de emisión de vibraciones como se definen en la norma prEN 12096.
- La referencia del código de ensayo de vibraciones mediante el cual se han medido y determinado los valores de emisión declarados.

- Si procede, dar información de medidas técnicas posibles para reducción de la vibración tal como tipo y peso del bloque de la fundación, utilización de amortiguadores, calidad de la alineación y del equilibrado de la máquina, etc.
- Si procede, dar información sobre las formas de minimizar la exposición a las vibraciones limitando los modos de operación de la máquina o limitando la duración de la exposición.
- Si procede, dar información sobre los equipos de protección individual a utilizar.

6.6 NORMAS TÉCNICAS SOBRE VIBRACIONES

A continuación se relacionan una serie de normas sobre vibraciones con aplicación, tanto para la medida y evaluación de la exposición a las vibraciones, como para apoyo en el tratamiento de las vibraciones en la Directiva máquinas.

6.6.1 VIBRACIÓN MANO-BRAZO

6.6.1.1 Normas para medida y evaluación (Normas B).

Descripción	CEN	ISO	UNE
Vibración mano-brazo. Medida de laboratorio de la vibración en la empuñadura de máquinas guiadas a mano. Generalidades	EN 1033:95		
Vibración mecánica. Guía para la medida y evaluación de la exposición humana a vibraciones mano-brazo	ENV 25349:92	ISO 5349	UNE ENV 25349:96
Vibración mecánica. Guía para la medida y evaluación de la exposición humana a vibraciones mano-brazo (Revisión ISO 5349:86)	WI 40	ISO WD 5349	
Respuesta humana a las vibraciones. Instrumentos de medida	ENV 28041:93	ISO 8041:90+ C1(93)	UNE ENV 28041:94

Normas para medida y evaluación (Normas B). (Continuación).

Descripción	CEN	ISO	UNE
Respuesta humana a las vibraciones. Instrumentos de medida. Amendment corrigendum 1	ENV 28041/ AC1		
Respuesta humana a las vibraciones. Instrumentos de medida. (Revisión de ISO 8041:90)	WI 41		
Herramientas mecánicas portátiles de mano. Medida de las vibraciones en la empuñadura. Parte 1: Generalidades	EN 28662-1:92	ISO 8662-1:88	UNE EN 28862-1:94
Vibración mecánica. Guías básicas para la medida de la vibración mano-brazo en el lugar de trabajo	WI 12		
Vibración mecánica: Evaluación de impulsos aislados transmitidos a la mano	WI 44		

6.6.1.2 Guías para la elaboración de Normas C.

Descripción	CEN	ISO	UNE
Seguridad de máquinas. Guía para la redacción de las cláusulas de vibraciones en las normas de seguridad	WI 24		
Vibración mecánica. Guía para la preparación de códigos de ensayo de vibraciones	WI 25		
Vibración mecánica. Declaración y verificación de valores de emisión de vibraciones	prEN 12096		

6.6.1.3 Normas para la reducción de la vibración.

Descripción	CEN	ISO	UNE
Vibración mano-brazo. Guía para la reducción de los peligros originados por las vibraciones. Parte 1: Métodos técnicos en el diseño de la máquina	CR 1030- 1:95		
Vibración mano-brazo. Guía para la reducción de los peligros originados por las vibraciones. Parte 2: Medidas de gestión en el lugar de trabajo	CR 1030- 2:95		
Vibraciones y choques mecánicos. Vibración mano-brazo. Método para la medida de la transmisibilidad a las vibraciones de materiales resilientes cuando se cargan con el sistema mano-brazo	prEN ISO 13753	ISO CD 13753	

6.6.1.4 Códigos de ensayo de vibraciones (Normas C).

Descripción	CEN	ISO	UNE
Herramientas mecánicas portátiles de mano. Medida de las vibraciones en la empuñadura. Parte 2: Martillos buriladores y martillos remachadores	EN 28662-2:94	ISO 8662-2:92	UNE EN 28662-2:96
Idem. Parte 2: Martillos buriladores y martillos remachadores - Amendment 1	EN 28662- 2:A1:95	ISO 8662- 2:92	UNE EN 28662-2/A1:96
Idem. Parte 3: Martillos perforadores y martillos rotatorios	EN 28662- 3:94	ISO 8662- 3:92	UNE EN 28662-3:96
Idem. Parte 3: Martillos perforadores y martillos rotatorios. Amendment 1	EN 28662- 3:A1:95	ISO 8662- 3:92	UNE EN 28662-3/A1:96
Idem. parte 4: Amoladoras	EN 28662- 4:1994	ISO 8662- 4:95	UNE EN ISO 8662-4:96
Idem. Parte 5: Rompedores de pavimentos y martillos para trabajos de construcción.	EN 28662- 5:1994	ISO 8662- 5:92	UNE EN 28662-5:96

Códigos de ensayo de vibraciones (Normas C). (Continuación).

Descripción	CEN	ISO	UNE
Idem. Parte 5: Rompedores de pavimentos y martillos para trabajos de construcción. Amendment 1	EN 28662-5:A1:95	ISO 8662-5:92	UNE EN 28662-5/A1:96
Idem. Parte 6: Taladradoras de percusión	EN 28662-6:1995	ISO 8662-6:94	UNE EN ISO 8662-6:96
Idem. Parte 7: Llaves, atornilladores y atornilladores de tuercas mediante impactos, impulsos o carraca	prEN ISO 8662-7	ISO DIS 8662-7	
Idem. Parte 8: Pulidoras y lijadoras rotatorias, orbitales y orbitales aleatorias	prEN ISO 8662-8	ISO DIS 8662-8	
Idem. Parte 9: Pisones	prEN ISO 8662-9	ISO DIS 8662-9	
Idem. Parte 10: Cortadoras y tijeras	prEN ISO 8662-10	ISO DIS 8662-10	
Idem. Parte 11: Herramientas fijadoras (clavadoras, grapadoras, espigadoras) de acción continua.	prEN ISO 8662-11	ISO DIS 8662-11	
Idem. Parte 12: Sierras y limadoras con acción de vaivén, rotativa u oscilante.	prEN ISO 8662-12	ISO DIS 8662-12	
Idem. Parte 13: Amoladoras de fundición.	prEN ISO 8662-13	ISO DIS 8662-13	
Idem. Parte 14: Máquinas para trabajar la piedra y martillos desincrustadores de agujas	pr EN 28662-14	ISO DIS 8662-14	

6.6.1.5 Normas para equipos de protección individual.

Descripción	CEN	ISO	UNE
Vibraciones y choques mecánicos. Vibración mano-brazo - Método para la medida y evaluación de la transmisibilidad de la vibración de los guantes a la palma de la mano	prEN ISO 10819	ISO DIS 10819	

6.6.1.6 Informes CEN.

Descripción	CEN	ISO	UNE
Vibración mano-brazo. Guía para la reducción de los peligros originados por las vibraciones. Parte 1: Métodos técnicos en el diseño de la máquina	CR 1030-1:95		
Vibración mano-brazo. Guía para la reducción de los peligros originados por las vibraciones. Parte 2: Medidas de gestión en el lugar de trabajo	CR 1030-2:95		
Vibración mecánica - Guía de los efectos, sobre la salud, de las vibraciones	WI 27		

6.6.1.7 Otras normas.

Descripción	CEN	ISO	UNE
Vibraciones y choques mecánicos. Exposición humana a la vibración. Vocabulario (Revisión de ISO 5805:81)		ISO DIS 5805	
Vibraciones y choques mecánicos. Exposición humana. Sistema de coordenadas biodinámicas		ISO DIS 8727	
Vibración mecánica. Medida de la fuerza de agarre y de empuje		ISO NP 15260	
Vibración mecánica. Medida de la potencia absorbida por el sistema mano-brazo cuando está expuesto a la vibración		ISO PWI 14836	
Medida e interpretación de la temperatura de la piel de los dedos antes, durante y después de la inmersión de las manos en agua fría		ISO PWI 14835	
Vibraciones y choques mecánicos. Medida e interpretación de los niveles umbrales de percepción vibrotáctiles para la evaluación de disfunciones en los nervios		ISO CD 13091	
Vibraciones y choques mecánicos. Impedancia mecánica libre de entrada del sistema mano-brazo		ISO DIS 10068	

6.6.2 VIBRACIÓN DE CUERPO COMPLETO

6.6.2.1 Normas para medida y evaluación (Normas B).

Descripción	CEN	ISO	UNE
Vibración mecánica. Ensayo de maquinaria móvil para la medida de la emisión de la vibración de cuerpo completo - Generalidades	EN 1032: 96		
Respuesta humana a las vibraciones. Instrumentos de medida	ENV 28041:93	ISO 8041:90 +C1:93	UNE ENV 28041:94
Respuesta humana a las vibraciones. Instrumentos de medida. Amendment corrigendum 1	ENV 28041/ AC1		
Respuesta humana a las vibraciones. Instrumentos de medida. Revisión de ISO 8041:90	WI 41		
Vibración mecánica. Métodos de ensayo de campo y artificiales para la medida de la vibración de cuerpo completo en maquinaria móvil.	WI 23		
Vibraciones y choques mecánicos. Evaluación de la exposición humana a la vibración de cuerpo completo. Parte 1: Requisitos generales. (Revisión y unión de ISO 2631-1:85 e ISO 2631-3:85)		ISO DIS 2631-1.2	
Idem. Modificación para incluir Anexo E: Guía para los efectos de la vibración, aceleración repetida y movimiento rotacional en tripulaciones y pasajeros de sistemas de transporte sobre guías fijas		ISO WD 2631-1/ DAM 1	
Vibraciones y choques mecánicos. Evaluación de la exposición humana a la vibración de cuerpo completo. Parte 2: Vibración continua y choques en edificios (1 a 80 Hz). (Revisión ISO 2631-2:89)		ISO WD 2631-2	
Guías básicas para la medida, en el lugar de trabajo, de la vibración de cuerpo completo	WI 45		

6.6.2.2 Guías para la elaboración de Normas C.

Descripción	CEN	ISO	UNE
Seguridad de máquinas. Guía para la redacción de las cláusulas de vibraciones en las normas de seguridad	WI 24		
Vibración mecánica. Guía para la preparación de códigos de ensayo de vibraciones	WI 25		
Vibración mecánica. Declaración y verificación de valores de emisión de vibraciones	prEN 12096		

6.6.2.3 Normas para la reducción de la vibración.

Descripción	CEN	ISO	UNE
Vibraciones y choques mecánicos. Aislamiento de las vibraciones en las máquinas. Información para el aislamiento en la fuente	prEN 1299		
Vibraciones mecánicas- Método de laboratorio para evaluar las vibraciones del asiento en el vehículo parte 1: requisitos generales	EN 30326-1:94	ISO 10326-1:92	UNE EN 30326-1:95
Maquinaria para movimiento de tierra. Evaluación en laboratorio de la vibración en el asiento del operador	prENV ISO 7096	ISO 7096:94	
Vibración mecánica- Método de medida de laboratorio para la transmisión de la vibración a los asientos de vehículos industriales	WI 29		
Vibración mecánica- Método de medida de laboratorio para la transmisión de la vibración a los asientos de máquinas de construcción de carreteras	WI 30		
Vibraciones y choques mecánicos- Guía para la seguridad de ensayos y experimentos con personas. parte 1: Exposición a la vibración mecánica y a choques repetidos	prEN ISO 13090-1	ISO DIS 13090-1	
Idem. Parte 2. Exposición a los impactos		ISO CD 13090-2	

6.6.2.4 Códigos de ensayo de vibraciones (Normas C).

No existe, por el momento, ningún código de ensayo de vibraciones.

6.6.2.5 Normas para equipos de protección individual.

No existen, por el momento, equipos de protección individual indicados para este tipo de vibración.

6.6.2.6 Informes CEN.

Descripción	CEN	ISO	UNE
Vibración mecánica - Guía de los efectos de la vibración en el cuerpo humano	WI 27		

6.6.2.7 Otras normas.

Descripción	CEN	ISO	UNE
Guías para la evaluación de la respuesta de los ocupantes de estructuras fijas, especialmente edificios y plataformas marinas, al movimiento horizontal de baja frecuencia (0,063 a 1 Hz)		ISO 6897:84	
Vibraciones y choques mecánicos. Evaluación de los choques repetitivos que afecten al cuerpo completo		ISO NP 15259	
Vibraciones y choques mecánicos. Distorsión de la actividad humana. Taxonomía		ISO DIS 9996	
Ensayo y evaluación de los choques (choques simples) en el hombre y sustitutos del hombre. Guía sobre aspectos técnicos		ISO DIS 10227	
Ensayo y evaluación de los choques (choques simples) en el hombre y sustitutos del hombre. Parte 2: Guía para una exposición segura a aceleraciones de impacto experimentales		ISO CD 10227-2	

Otras normas. (Continuación)

Descripción	CEN	ISO	UNE
Tractores agrícolas sobre ruedas y maquinaria de campo. Medida de la vibración de cuerpo completo en el conductor		ISO 5008:79	
Vibraciones y choques mecánicos. Modelo combinado para la impedancia mecánica y transmisibilidad del cuerpo completo (Revisión de ISO 5982:81 e ISO 7962:87)		ISO CD 5982	

BIBLIOGRAFÍA

Wassermann D.E. Human aspects of occupational vibration. Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., 1987.

HSE. Hand-arm vibration. 1994.

Pelmear P., William T., Wassermann D. Hand-arm vibration: A comprehensive guide for occupational health professionals. Van Nostrand Reinhold. New York. 1992.

INRS. Vibraciones en el lugar de trabajo. 1994.

Griffin M.J. Handbook of human vibration. Academic Press. 1990.

