EVALUACIÓN DE LAS VIBRACIONES TRANSMITIDAS AL SISTEMA MANO-BRAZO



HAND-ARM VIBRATION RISK ASSESSMENT

Recibido: 22/10/07
Aceptado: 14/01/08

Jesús Álvarez Santos
Ingeniero Industrial
Universidad de León

Javier Madera García
Dr. Ingeniero de Minas
Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría
Universidad de Oviedo

José A. Miguel Dávila
Dr. Administración y Dirección de Empresas
Universidad de León

RESUMEN

Desde la aparición del Real Decreto 1311/2005, la evaluación de los riesgos derivados de la exposición a vibraciones se encuentra impuesta por una legislación específica que se complementa, en el caso de las vibraciones mano-brazo, con la norma UNE-EN ISO 5349-1. El objetivo de este artículo está orientado a describir las mediciones de aceleración ponderada en frecuencia, según dicha especificación técnica y conocer otros criterios científicos que contribuyen a la confianza del resultado de la evaluación: la impedancia del sistema mano-brazo y el acoplamiento del sistema dedos-mano.

Palabras clave: Vibraciones mano-brazo, aceleración ponderada en frecuencia, fuerzas de acoplamiento.

ABSTRACT

Since Royal Decree 1311/2005 was published, hand-arm vibration exposure is contained in regulation policies and the international standard UNE-EN ISO 5349-1. The core of this paper is the frequency-weighted acceleration measurement as per ISO 5349 and scientific risk assessment criteria: hand-arm system impedance and coupling forces.

***Key words**: Hand-arm vibrations, acceleration frequency-weighted, coupling forces.*

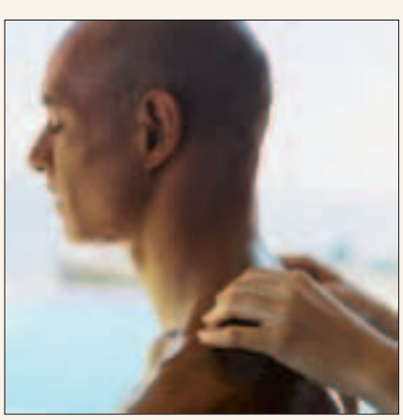
1.- INTRODUCCIÓN

La relación causa-efecto en Higiene Industrial no es fácil de determinar. En muchos casos, la ausencia de datos epidemiológicos no permite contrastar el grado de peligrosidad de las condiciones de trabajo. En otras ocasiones, el método de evaluación no representa las condiciones reales de operación o los resultados obtenidos no superan los límites legales establecidos. Ambas situaciones pueden dar por finalizado el proceso de evaluación y concluir precipitadamente con la ausencia de riesgo, lo cual contradice el esquema de actuación en Higiene Industrial caracterizado, entre otros factores, por el diseño de



una estrategia de medida y la búsqueda de la oportunidad de medición. La exposición a vibraciones, como el resto de contaminantes físicos, precisa, por lo tanto, de un estudio técnico riguroso y fiable.

Los problemas vasculares, de huesos o de articulaciones, nerviosos o musculares aparecen en la definición legal de las vibraciones transmitidas al sistema mano-brazo (Real Decreto 1311/2005). La Encuesta sobre Condiciones de Trabajo para el año 2005 efectuada por el **Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo** [4] pone de manifiesto una exposición extendida al 13,8% de los trabajadores consultados, de los cuales un 11% de los casos están referidos a vibraciones mano-brazo. Las vibraciones mano-brazo cuentan con una disposición específica que



reconoce los riesgos derivados de la exposición y la obligatoriedad de su evaluación de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 5349-1, a la vez que propone los criterios de referencia para poder comparar el resultado de dicha evaluación. Sin embargo, la especificación técnica admite la existencia de varios factores que pueden incidir en los efectos de la exposición y que no han sido integrados en el procedimiento propuesto, entre ellos, las fuerzas de acoplamiento del sistema dedos-mano en la empuñadura de la herramienta o en la pieza guiada

2.- EFECTOS SOBRE LA SALUD DE LAS VIBRACIONES EMITIDAS POR LA MANO

Muchos de los equipos de trabajo o piezas de trabajo conducidas que existen en los diferentes procesos industriales, transmiten durante su funcionamiento o guiado vibraciones, cuya energía puede afectar a un solo brazo o a ambos simultáneamente. Esta condición de trabajo ha dado lugar a daños vasculares, neurológicos, musculares, músculo esqueléticos, así como otros daños de difícil clasificación pero inducidos por la exposición a vibraciones y, en ocasiones, con efectos dependientes del género del trabajador [5]. Varios estudios concluyen con un índice más alto de síntomas relacionados con la exposición a vibraciones en mujeres que en hombres, así como con la necesidad de integrar requisitos de género en el diseño ergonómico de herramientas vibratorias (**Agencia Europea para la Seguridad y Salud en el Trabajo, 2006**).

La última revisión del cuadro de enfermedades profesionales (Real Decreto 1299/2006) actualiza nuestra legislación, a los daños derivados de la exposición a vibraciones mano-brazo en términos de daños vasculares y osteoarticulares, a la vez que propone la futura revisión del mismo, con los efectos de las denominadas vibraciones cuerpo entero. Sin embargo, no concede un espacio para los efectos neurológicos, los cuales han sido puestos de manifiesto en diversos estudios: disminución de la coordinación o la destreza manual, la afección de los receptores sensoriales, incluso la alteración de la estructura nerviosa de las yemas de los dedos, son algunos de los desórdenes neurológicos derivados de la exposición a vibraciones mano-brazo [7].

3.- EVALUACIÓN DE RIESGOS SEGÚN UNE-EN ISO 5349-1

De acuerdo con el Real Decreto 1311/2005, la evaluación de la exposi-

ción debe basarse en el cálculo del valor de exposición diaria, normalizado para un periodo de referencia de 8 horas: A(8). Se trata de un término alternativo que representa la exposición diaria a vibraciones, $a_{hv(eq,8h)}$, que es el valor total de la energía equivalente de las vibraciones en un periodo de referencia de 8 horas. Para determinar dicha exposición diaria, la norma UNE-EN ISO 5349-1 ésta basada en el cálculo del valor eficaz de la aceleración, teniendo en cuenta la frecuencia, la magnitud y la duración de la vibraciones junto con la posibilidad de exposición acumulativa. El valor eficaz de la aceleración viene dado por su valor cuadrático medio ponderado o rms (root mean square) ponderado, es decir, la raíz cuadrada de la media ponderada de los cuadrados de los valores.

La confianza del resultado de la evaluación ha sido criticada por algunos autores, al no tener en cuenta en la evaluación un factor tan significativo como es el acomplamiento del sistema dedos-mano a la fuente de vibraciones, teniendo en cuenta que la absorción de energía depende en gran medida del mismo [2]. Por otro lado, existen condiciones de trabajo en las que la utilización del valor eficaz de la aceleración podría no aportar la suficiente bondad en el resultado, si no se seleccionan adecuadamente los periodos de muestreo, por ejemplo, en tareas intermitentes, existencia de niveles pico u operaciones con distintos equipos de trabajo. Sin embargo, al tratarse de una norma referenciada por la disposición específica, debe considerarse como de obligado cumplimiento.

Las vibraciones que entran en la mano contienen componentes en las tres direcciones, cuyos efectos, según la norma, son igualmente perjudiciales. Para registrar las aceleraciones eficaces ponderadas para los ejes *x*, *y* y *z*, las medidas deben hacerse en las tres direcciones, obteniendo los valores eficaces de aceleración: a_{hwx}, a_{hwy}, a_{hwz}. Si disponemos de varias medidas para un mismo eje con diferentes periodos de muestreo, es preciso calcular el valor rms en cada uno; la expresión particularizada para el eje *x* sería:

$$a_{hwx} = \sqrt{\frac{1}{T_x}\sum_{j=1}^{N} a^2_{hwxj}\, t_{xj}}$$

siendo:

a_{hwxj} la magnitud de las vibraciones (valor rms ponderado) en la muestra j en el eje X;

t_{xj} la duración de la medición en la muestra j en el eje X;

T_x el tiempo total de la medición en el eje X; y,

N el numero de muestras en el eje X.

Así, el valor de la aceleración eficaz ponderada en frecuencia, a_{hv}, es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores obtenidos:

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

El cálculo de la exposición diaria A(8) debe particularizarse para un periodo de referencia de 8 horas con objeto de poderlo comparar con los criterios de referencia aportados por el Real Decreto 1311/2005 y se obtiene con la expresión:

$$A(8) = a_{hv}\sqrt{\frac{T}{T_o}}$$

a_{hv} el valor total de la aceleración eficaz ponderada en frecuencia;

T_o el periodo de referencia normalizado de 8 horas; y,

T la duración total diaria de la exposición a las vibraciones a_{hv}.

Si durante la jornada laboral el trabajador está sometido a varias fuentes de vibraciones A(8), se calcularía aplicando la siguiente ecuación:

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T_o}\sum_{j=1}^{N} a^2_{hvj}\, t_j}$$

siendo:

a_{hvj} la aceleración eficaz ponderada en la fuente j;

t_j la duración de la exposición a la fuente j;

T_o el periodo de referencia normalizado de 8 horas; y,

N el número de fuentes a las que se está expuesto.

Para la evaluación es recomendable el empleo de medidas triaxiales de las vibraciones, sin embargo, en algunas ocasiones puede no ser posible la obtención de la terna. En ese caso, según la norma UNE-EN ISO 5349-1, el valor total debe calcularse empleando los valores registrados y un factor de multiplicación comprendido entre 1,0 para herramientas que tienen un eje altamente dominante y 1,7 cuando no existe un eje dominante. Según la norma UNE-EN ISO 5349-2, un eje de vibraciones se considera dominante, cuando los valores de las vibraciones en los otros ejes no dominantes son inferiores al 30% del valor de las vibraciones en el eje dominante.

Los puestos de trabajo que presentan riesgo por exposición a vibraciones, cuentan con diversidad de tareas desde el punto de vista del tiempo de exposición; éste viene dado por el contacto de la mano con la superficie vibrante, herramienta motorizada o pieza de trabajo guiada a mano. Algunos periodos de exposición permiten mediciones de larga duración, en las que la tarea es de naturaleza continua o bien incluye pequeñas pausas definidas en las que no existen vibraciones. Por otro lado, cuando el contenido del trabajo exige cambios significativos en el posicionamiento de las manos, la herramienta motorizada o la pieza guiada o bien existen alteraciones en el equipamiento o funcionamiento de las herramientas utilizadas, las mediciones deben ajustarse a periodos de corta duración que sean representativos de la exposición, para lo cual pueden simularse operaciones con duración ininterrumpida que sean comparables con las condiciones reales de trabajo. Idéntico tratamiento pueden recibir aquellos casos en los que las vibraciones se corresponden con estados energéticos propios de impulsos o choques de corta duración, por ejemplo, las grapadoras

neumáticas. Tanto para procedimientos de trabajo simulados, como para mediciones efectuadas en el transcurso habitual de la tarea, la norma recomienda que la aceleración promedio se establezca a partir de tiempos de muestreo no inferiores a 1 minuto. Asimismo, aunque es preferible tomar un determinado número de muestras más que una sola de larga duración, deben evitarse las mediciones menores de 8 segundos.

4.- CRITERIOS DE EVALUACIÓN NO CONTEMPLADOS EN UNE-EN ISO 5349-1

La energía absorbida en función del acoplamiento del sistema dedos-mano o la impedancia del sistema mano-brazo no interviene en el procedimiento de evaluación propuesto por la norma UNE-EN ISO 5349-1. Sin embargo, ésta advierte en su Anexo D de la posible influencia de las fuerzas de agarre o empuje en los efectos de la exposición junto con otros factores que no deben pasar desapercibidos, por lo que éstos deben registrarse, al tiempo que se debe mantener una actitud expectante sobre los resultados de las investigaciones que traten de acotar tales efectos.

Actualmente se reconoce que la magnitud de las vibraciones transmitidas al sistema mano brazo es dependiente de las fuerzas de acoplamiento del sistema dedos-mano a la superficie vibrante. Sin embargo, existen poco estudios científicos que cuantifiquen la contribución de la fuerza ejercida por la mano sobre la energía absorbida y, en algunos de los casos, los resultados son contradictorios [2]. Esta situación ha llevado a introducir otros factores que relacionen ambos conceptos como, por ejemplo, el tamaño de la empuñadura o la pieza guiada. Aldien et al. (2006) comprueban una fuerte dependencia entre el tamaño y la energía absorbida, esta última medida en términos de fuerza (dinámica) y velocidad de acuerdo con la expresión:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T F(t)\cdot v(t)\,dt$$

La investigación referenciada expone que la mayoría de la energía absorbida se corresponde con los estados energéticos de baja frecuencia (200 Hz) y que un mayor tamaño de la empuñadura o la pieza guiada corresponde a una mayor energía absorbida, con independencia de la existencia de fuerzas de agarre o empuje.

Por su parte, la impedancia del sistema mano-brazo es especialmente difícil de obtener si es que se precisa de su cálculo para estimar efectuar algún cálculo energético. La norma ISO 10068 aporta valores normalizados para la impedancia mecánica definida como la razón entre la fuerza dinámica y la velocidad. La energía absorbida suele obtenerse a partir de la parte real del producto vectorial visto en la expresión anterior o en función de la impedancia y el cuadrado de la velocidad [3], [2] según la expresión:

$$P_{abs}(\omega) = \mathrm{Re}\,(Z(\omega))\,|V(\omega)|^2$$

Aunque la norma UNE-EN ISO 5349-1 asume efectos igualmente perjudiciales en los tres ejes, la potencia absorbida es dependiente de la dirección de la vibración y las fuerzas de acoplamiento condicionan la impedancia del sistema mano-brazo [3]. Si la impedancia del sistema-mano



brazo depende de factores relacionados con la postura de trabajo y las fuerzas de acoplamiento, aunque los efectos sean perjudiciales en todas las direcciones, es necesario particularizar las investigaciones para cada uno de los ejes.

El desarrollo de medidas que minimicen la transmisión de vibraciones pasa por conocer la naturaleza y magnitud de las fuerzas de acoplamiento y la energía transmitida, aunque las investigaciones publicadas no cuentan con un método comúnmente reconocido para tal efecto [12]. Además, los instrumentos empleados pueden alterar posturas, áreas de contacto o la confianza cotidiana del

El desarrollo de medidas que minimicen la transmisión de vibraciones pasa por conocer la naturaleza y magnitud de las fuerzas de acoplamiento y la energía transmitida

La selección de medidas para la reducción o control de vibraciones suele particularizarse en la protección individual

operador durante la tarea. Al mismo tiempo, los procedimientos simulados de trabajo incrementan aún más la posibilidad de obtener datos que no se corresponden con la realidad. Otra de las dificultades que impiden integrar estos conceptos en el procedimiento de evaluación es que las técnicas disponibles para la obtención de fuerzas de acoplamiento y valores de energía absorbida precisan de medios que no están habitualmente a disposición de las empresas o las entidades externas que realizan mediciones.

5.- EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL

A pesar de la obligatoriedad de cumplir con los principios de la acción preventiva existentes en la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, es muy común acudir a la protección individual antes de agotar otras medidas técnicas u organizativas que contribuyan a la reducción y/o control del riesgo derivado de la exposición a vibraciones. En este sentido, la garantía de la eficacia protectora de los equipos seleccionados exige una adecuada selección de los mismos.

La especificación técnica utilizada para el ensayo de los guantes de protección contra vibraciones mecánicas es la UNE-EN ISO 10819, según la cual, para que un guante sea considerado como "antivibratorio" debe cumplir con los tres requisitos:

i) la transmisibilidad del guante en medias frecuencias (TR_M) debe ser inferior a 1;
ii) la transmisibilidad del guante en altas frecuencias (TR_H) debe ser inferior a 0,6; y,
iii) que los dedos del guante cuenten con las mismas propiedades (materiales y espesor) que la parte del guante que cubre la palma de la mano.

La norma define "transmisibilidad" como la relación entre las aceleraciones medidas en la superficie de la mano y el punto de referencia. Valores de transmisibilidad mayores que 1 indican que el guante amplifica la vibración y, menores que 1, que el guante atenúa la vibración.

La norma utiliza la transmisibilidad en media y alta frecuencia como indicadores relativos de protección ya que, al mismo tiempo, advierte que el cumplimiento de estos criterios no implica que el uso de los guantes elimine los peligros derivados de la exposición a vibraciones. De nuevo, el acoplamiento del sistema dedos-mano recobra importancia debido a las posibles alteraciones en el agarre y fuerza que actúan en la transmisibilidad, incrementando el riesgo de efectos dañinos [6].

La búsqueda de prestaciones antivibratorias entre la oferta actual de guantes de protección pude resultar una tarea difícil si no se acompaña del necesario rigor técnico. En primer lugar, no son muchas las firmas que



La selección de medidas para la reducción o control de vibraciones suele particularizarse en la protección individual sin agotar, en primer lugar, otras medidas técnicas u organizativas más eficaces como la selección, mantenimiento o adecuación de equipos

certifican la protección frente a vibraciones y, en segundo lugar, en el proceso de selección no intervienen profesionales con la suficiente capacitación; si para la evaluación de riesgos se exige una cualificación de nivel superior en el área de Higiene Industrial, la selección de equipos no merece menor atención, aunque es cierto que la propia evaluación debe definir exactamente el equipo de protección individual que, en su caso, deba emplearse. Además, muchos de los guantes que cuentan con certificación antivibratoria por parte del fabricante, no cumplen con los requisitos de la norma UNE-EN ISO 10819 [8]. Recordemos que los equipos de protección individual de categoría II únicamente se someten al examen CE de tipo una vez, antes de la comercialización y en esta categoría, no existe ningún procedimiento para garantizar la continuidad en la fabricación con respecto al modelo ensayado.

6.- CONCLUSIONES

Los efectos derivados de la exposición a vibraciones mano-brazo son de distinta naturaleza y concretamente, los daños vasculares y osteoarticulares se encuentran incluidos en la última revisión del cuadro de enfermedades profesionales en nuestro país. La investigación sobre tales efectos, debe continuar contrastando hipótesis que permitan conocerlos en mayor profundidad.



El criterio de evaluación actual está basado en la medición de la aceleración ponderada en frecuencia

El criterio de evaluación actual está basado en la medición de la aceleración ponderada en frecuencia, que proporciona una idea apropiada sobre la magnitud de las vibraciones. Sin embargo, para acotar los efectos en función de la naturaleza de la vibración, algunas de las investigaciones científicas más recientes, toman en consideración las fuerzas de acoplamiento del sistema dedos mano, la impedancia del sistema mano-brazo y la energía absorbida en cada uno de los ejes.

La selección de medidas para la reducción o control de vibraciones suele particularizarse en la protección individual sin agotar, en primer lugar, otras medidas técnicas u organizativas más eficaces como la selección, mantenimiento o adecuación de equipos. Por su parte, la protección individual está poco desarrollada a pesar de la extensión del contaminante físico y las prestaciones antivibratorias no están garantizadas con la suficiente confianza.

7.- BIBLIOGRAFíA

[1] Agencia Europea para la Seguridad y Salud en el Trabajo. "Estudio de Investigación. Las cuestiones de género en relación con la seguridad y salud en el trabajo. Revisión". 2006. Luxemburgo. Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas. ISBN 92-9191-121-6.

[2] Aldien, Y., Marcotte, P., Rakheja, S., Boileau, P.-É. "Influence of hand forces and andel size on power absortion of human hand-arm exposed to z_h-axis vibration". Journal of Sound and Vibration. 2006. Vol. 290, pp. 1015-1039.

[3] Besa, J.A., Valero, F.J., Suñer, J.L., Carballeira, J. "Characterisation of the mechanical impadance of the human hand-arm system: The influence of vibration direction, hand-arm posture and mucle tension". International Journal of Industrial Ergonomics. 2007. Vol. 37, pp. 225-231.

[4] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. 2006. "Encuesta de Condiciones de Trabajo 2005". http://www.mtas.es/insht/statistics/ect05_prese.htm Acceso 22 de octubre de 2007.

[5] Neely, G., Burström, L. "Gender differences in subjetive responses to hand-arm vibration". Industrial Ergonomics. 2006. Vol. 36, pp. 135-140.

[6] Ledesma J., Cáceres, P., Ruiz, J., , Pérez, M.J., Domínguez, F., Martín, J., Nieto, F.J. Ponencia presentada en primer Congreso Internacional de Prevención de Riesgos Laborales. Tenerife 24 de febrero de 2000.

[7] Lundborg, G., Rosen, B., Knutsson, L., Holtas, S., Stahlberg, F., Larsson, M. "Hand-Arm Vibration Syndrome (HAVS): Is there a central nervous component? An fMRI Study". Journal of Hand Surgery. 2002. 27B: 6, pp. 514-519.

[8] Santurio, J.M., Rodríguez, J., Argüelles, E. "Estudio de la exposición a vibraciones mano-brazo en el trabajo con herramientas portátiles". 2006. Proyecto SV-PA-04-09 del Instituto Asturiano de Prevención de Riesgos Laborales y la Universidad de Oviedo.

8.- LEGISLACIÓN

[9] Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.

[10] Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas.

[11] Real Decreto 1299/2006, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y registro.

[12] McDowell, T.W., Wiker, S.F., Dong, R.G., Welcome, D.E., Schopper, A.W. "Evaluation of psychometric estimates of vibratory hand-tool grip and push forces". International Journal of Industrial Ergonomics. 2006. Vol. 36, pp. 119-128.

9.- ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- UNE-EN ISO 10819. Vibraciones mecánicas y choques. Vibraciones mano-brazo. Método para la medida y evaluación de la transmisibilidad de la vibración por los guantes a la palma de la mano.

- UNE-EN ISO 5349-1. Vibraciones mecánicas. Medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 1: Requisitos generales.

- UNE-EN ISO 5349-2. Vibraciones mecánicas. Medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 2: Guía práctica para la medición en el lugar de trabajo.

- ISO 10068. Mechanical Vibration and Shok-free Mechanical Impedance of de Human Hand-Arm System at the Diving Point. International Organization of Standardization, Geneve, Switzerland. ■