

ESTUDIO DE LA VIBRACIÓN MANO – BRAZO CUANDO SE EMPLEAN TALADROS PERCUTORES SOBRE TRES MATERIALES DISTINTOS

STUDY OF HAND – ARM VIBRATION WHEN PERCUSSION DRILLS ARE USED ON THREE DIFFERENT MATERIALS

M. Nieves González García⁽¹⁾, Joana Cristina Cardoso Guedes⁽²⁾, Antonio José Carpio de los Pinos⁽³⁾, João Santos Baptista⁽⁴⁾

¹ Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, mariadelasnieves.gonzalez@upm.es

² Universidade do Porto, Porto, Portugal, iccg@fe.up.pt

³ Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, aj.carpio@upm.es

⁴ Universidade do Porto, Porto, Portugal, jsbap@fe.up.pt

RESUMEN

La creciente mecanización de las labores industriales producida durante las últimas décadas a nivel internacional ha supuesto un gran incremento del número de trabajadores expuestos a vibraciones mano-brazo debido al empleo de herramientas vibrantes de mano. Además del malestar producido por la sintomatología de la enfermedad, las vibraciones mano-brazo conducen a problemas socioeconómicos para los pacientes y elevados costes para la sociedad.

El síndrome de vibración mano-brazo es una enfermedad industrial reconocida que se produce como consecuencia de una exposición prolongada a vibraciones producidas por herramientas que vibran durante su funcionamiento. El síndrome agrupa una serie de trastornos que afectan al sistema circulatorio periférico, al sistema nervioso periférico y al sistema esquelético de la mano y el brazo. La clínica de este síndrome incluye parestesias en los dedos, dolor, debilidad en la muñeca y mano, blanqueamiento digital, intolerancia al frío, debilidad en los flexores digitales y músculos intrínsecos, decoloración y lesiones tróficas superficiales de los dedos. Si bien el síndrome mano-brazo puede ser reversible en las fases más tempranas de la enfermedad, la eliminación de los síntomas es muy complicada en los casos más severos.

Los taladros percutores son herramientas muy empleadas en el sector de la construcción. Para la realización de los taladros el sistema combina un movimiento de rotación con impactos en la dirección de avance de la broca. Cuando se utilizan taladros percutores en el sector de la construcción, la magnitud de la vibración producida sobre el sistema mano-brazo también se puede ver afectada por otros factores como pueden ser las características físicas y mecánicas del material que se taladra.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que el uso de taladros percutores en materiales de construcción genera niveles de vibración mano-brazo que superan con frecuencia los valores límite establecidos por la normativa vigente, evidenciando la necesidad de medidas preventivas específicas y de una revisión crítica de los valores declarados por los fabricantes.

Palabras clave: Prevención, seguridad, higiene industrial, vibración mano-brazo, taladro percutor

ABSTRACT

The increasing mechanization of industrial work in recent decades at international level has led to a large increase in the number of workers exposed to hand-arm vibrations due to the use of vibrating hand tools. In addition to the discomfort produced by the symptomatology of the disease, hand-arm vibrations lead to socio-economic problems for patients and high costs for society.

Hand-arm vibration syndrome is a recognized industrial disease which occurs as a result of prolonged exposure to vibrations produced by tools that vibrate during operation. The syndrome groups a number of disorders that affect the peripheral circulatory system, the peripheral nervous system and the skeletal system of the hand and arm. Clinical signs of this syndrome include paresthesia in the fingers, pain, weakness in the wrist and hand, digital whitening, cold intolerance, weakness in the digital flexors and intrinsic muscles, discoloration and superficial trophic lesions of the fingers. Although hand-arm syndrome can be reversible in the earliest stages of the disease, the elimination of symptoms is very complicated in the most severe cases.

Impact drills are widely used in the construction industry. For the drilling, the system combines a rotational movement with impacts in the direction of the drill. When percussion drills are used in the construction industry, the magnitude of vibration produced on the hand-arm system may also be affected by other factors such as the physical and mechanical characteristics of the material being drilled.

The results obtained show that the use of hammer drills in construction materials generates hand-arm vibration levels that frequently exceed the limit values established by current regulations, highlighting the need for specific preventive measures and a critical review of the values declared by manufacturers.

Keywords: Prevention, safety, industrial hygiene, hand-arm vibration, hammer drill

1. INTRODUCCIÓN

El síndrome de vibración mano-brazo (HAVS, por sus siglas en inglés) es una enfermedad industrial reconocida que se produce como consecuencia de una exposición prolongada a vibraciones producidas por herramientas que vibran durante su funcionamiento. HAVS agrupa una serie de trastornos que afectan al sistema circulatorio periférico, al sistema nervioso periférico y al sistema esquelético de la mano y el brazo (Maeda et al., 2019; Taylor, 1988; Malchaire et al., 2001; Heaver et al., 2010; Mahbad & Noriaki, 2011).

Durante las últimas décadas se ha producido un notable incremento a nivel mundial en el número de trabajadores expuestos a vibraciones mano brazo debido al empleo de herramientas de mano vibrantes (Weier, 2020).

Se estima que entre el 1,7 % y el 3,6 % de los trabajadores europeos y de USA están expuestos potencialmente a las vibraciones transmitidas a las manos y a los brazos. Esto constituye un grave problema de salud laboral debido al elevado número de trabajadores afectados (NIOSH, 1983; ILO, 2011).

Desde finales de la década de los 80 se han realizado numerosos estudios en los cuales se ha puesto de manifiesto la relación entre la exposición a vibraciones mano-brazo y los efectos producidos (Yu et al., 1986; Gemne, 1997; Bovenzi, 1998; Bovenzi et al., 2019) confirmando que el uso prolongado de herramientas con alto valor de vibración podría desencadenar el síndrome HAVS (NIOSH, 1997; Griffin, 1990; Burdorf & Monster, 1991). El US National Institute for Occupational Safety and Health estimó que 1,45 millones de trabajadores de USA están expuestos cada año a vibraciones mano brazo perjudiciales. En Canadá, HAVS es la enfermedad más común entre los trabajadores que usan herramientas de mano vibrantes. Entre 2004 y 2016 los trabajadores de Reino Unido realizaron más de 10.000 reclamaciones por HAVS al programa Industrial Injuries Disablement Benefit. Según la Sixth Working Condition Survey, casi el 20 % de los trabajadores de la Unión Europea de los 28 (EU28) están expuestos a las vibraciones producidas por herramientas o máquinas durante al menos una cuarta parte de su vida laboral.

La transmisión de la vibración y su propagación en el organismo a través del sistema mano-brazo es un fenómeno complejo, al que se ha dedicado un esfuerzo investigador considerable, que involucra varios factores como son las características biomecánicas del cuerpo, la impedancia mecánica de la mano, la postura, la fuerza desarrollada por las manos, el tamaño de las manos, la existencia de absorbedores o la existencia simultánea de percusión con la vibración. Todos estos factores afectan a la intensidad de la vibración y a su transmisibilidad.

Los taladros percutores son herramientas muy empleadas en el sector de la construcción. Para la realización de los taladros el sistema combina un movimiento de rotación con impactos en la dirección de avance de la broca.

Sin embargo, cuando se utilizan taladros percutores en el sector de la construcción, la magnitud de la vibración producida sobre el sistema mano-brazo también se puede ver afectada por otros factores como pueden ser las características físicas y mecánicas del material que se taladra, el tipo de taladro percutor

empleado o el tamaño de la broca, la postura, el agarre y la fuerza aplicada, que influyen en el punto de aplicación de la fuerza, su dirección, magnitud y duración. Además, estos factores pueden influir de manera distinta a trabajadores con características antropomórficas distintas. Este estudio tiene como objetivo analizar la magnitud de la vibración mano-brazo generada por dos modelos distintos de taladros percutores al perforar tres tipos de materiales de uso común en la construcción, con el fin de valorar su adecuación a los valores límite establecidos por la normativa europea.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Para comprobar la influencia del equipo mecánico empleado en las operaciones de taladrado sobre la magnitud de la vibración producida, se han empleado dos taladros percutores nuevos de la empresa Hilti modelos TE-3-C SDS Plus (H1) y TE 7 SDS Plus (H2) equipados con una broca nueva de 12 mm de diámetro, también de la empresa Hilti. En la tabla 1 se indican las características garantizadas por el fabricante de los dos taladros percutores.

Tabla 1. Características garantizadas por el fabricante de los dos taladros percutores utilizados

Taladro percutor	Peso (kg)	rpm	Frecuencia impacto (golpes/m)	Aceleración triaxial (m/s ²)
H1	3,0	1300	5160	15,5
H2	2,9	1050	4980	11

Se ha trabajado sobre escayola y morteros de cemento que son materiales habitualmente empleados en la industria de la construcción como revestimiento de cerramientos verticales y horizontales. Se han fabricado probetas de ambos materiales de dimensiones 260x260x90 mm. La escayola es E 30 de la casa comercial Fidensa S.L. El mortero de cemento utilizado ha sido el mortero para el revestimiento de muros y tabiques ya ensacado Tector Plast 160 Pro HF de Holcim. Ambos materiales se emplean habitualmente en las obras de construcción. Para poder caracterizar física y mecánicamente ambos materiales se han fabricado probetas de 40x40x160mm y, después de desmoldadas y curadas, se ha obtenido la densidad, resistencia a compresión y resistencia a flexión. En la tabla 2 se indican los valores obtenidos.

Tabla 2. Características físicas y mecánicas de las probetas ensayadas

Material	Relación a/material	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a flexión (MPa)
Escayola	0,78	910	6,2	3,7
Mortero de cemento	0,22	1630	7,2	3,1

Para valorar la influencia del efecto producido cuando durante la realización de un taladro se perforan dos materiales distintos se han fabricado probetas constituidas por un ladrillo cerámico hueco de dimensiones 400 x 200 x 70 mm a los que se ha aplicado en una de las caras una capa de escayola de 15 mm de espesor (R). La escayola utilizada es la misma que la empleada en las probetas de ese material.

De este modo, se han utilizado como variables dos taladros percutores con los que se han taladrado tres superficies distintas, resultando un total de 6 situaciones de ensayo distintas. Cada uno de estos valores se ha obtenido a partir de cuatro taladros, resultando finalmente 24 operaciones de taladrado. En la figura 1 se muestra una de las operaciones de taladrado junto con el aspecto de la probeta de escayola una vez efectuados los ensayos. Para simular la situación de la existencia de un tabique o muro donde se efectúa el taladro, se han colocado los elementos comprimidos con una prensa a la que se ha sometido en carga de forma manual.

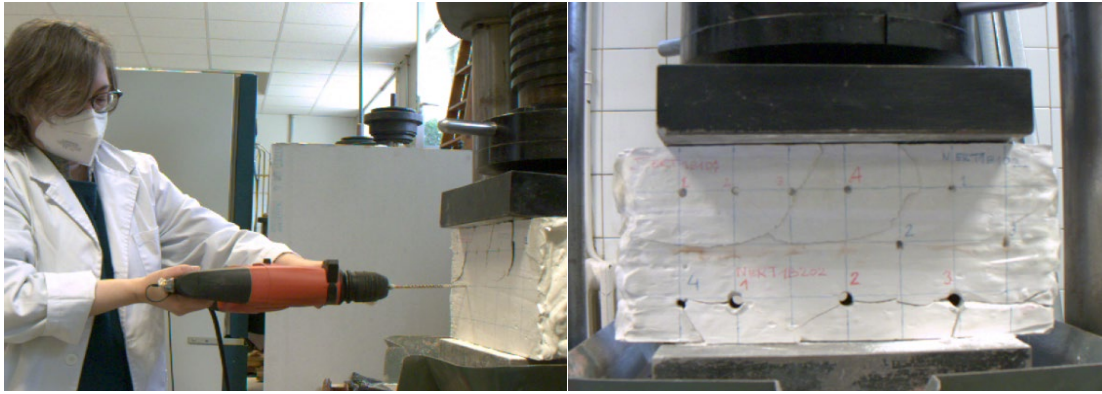


Figura 1. Ejecución de los taladros y probeta de escayola taladrada

Los datos se han adquirido con un equipo de medición y procesamiento de datos de la empresa Bruel&Kjaer formado por un acelerómetro triaxial Delta Tron modelo 4524-C, un adquisidor de datos LAN-XI y el software de procesamiento BK Connect.

2.2 Métodos

La Directiva Europea 2002/44/EC, haciendo referencia a la norma ISO 5349-1:2001, indica que para realizar el cálculo de la exposición a las vibraciones mano-brazo debe medirse la aceleración eficaz ponderada en frecuencia en cada uno de los tres ejes x, y, z para un período normalizado de 8 h de duración (ecuación 1):

$$= (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

Donde el subíndice i indica cada uno de los tres ejes coordenados x, y, z definidos de acuerdo a la norma ISO 5349-1:2001; a_{wi} es la aceleración eficaz ponderada en frecuencia rms en la dirección de los tres ejes; T_d es el período diario de la exposición a la vibración y T_0 es el período de referencia (8h). La norma ISO 5349 asume que, a diferencia de lo que sucede cuando se estudian las vibraciones del cuerpo entero, las vibraciones mano-brazo producidas en cualquiera de las direcciones son igual de perjudiciales, por lo que no se aplica ningún factor de ponderación al valor obtenido en cada uno de los ejes (Dong et al., 2015).

El valor rms de la aceleración en la dirección de cada uno de los ejes se define como:

$$= (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

Donde T es el tiempo de duración de la medida y $a_{wi}(t)$ es la aceleración ponderada en frecuencia en la dirección del eje correspondiente.

La magnitud total de la aceleración se obtiene según la norma ISO 5349 con la ecuación:

$$= (3)$$

Para determinados tipos de vibraciones, especialmente para aquellos en los cuales suceden choques, este método de evaluación puede subestimar los efectos de la vibración. En este caso la norma ISO recomienda la evaluación del factor de cresta (CF), parámetro que se define como el módulo del cociente entre el máximo valor de pico de la aceleración ponderada en frecuencia y su valor rms. La norma ISO especifica que para valores de CF iguales o inferiores a 9, el método basado en el valor de rms es apropiado.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la figura 2 se muestra la variación de la aceleración ponderada en frecuencia en cada uno de los ejes con la frecuencia a la que se produce para uno de los ensayos.

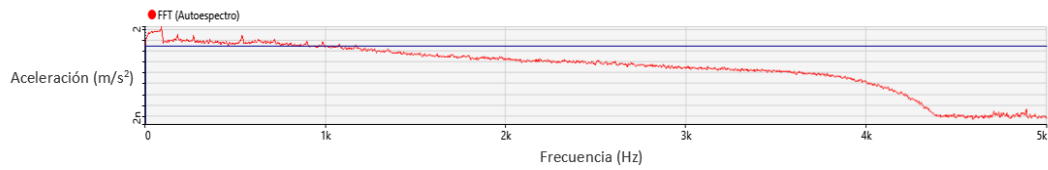
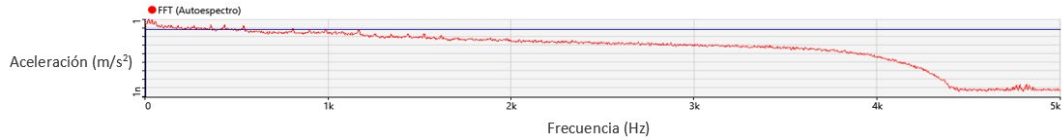
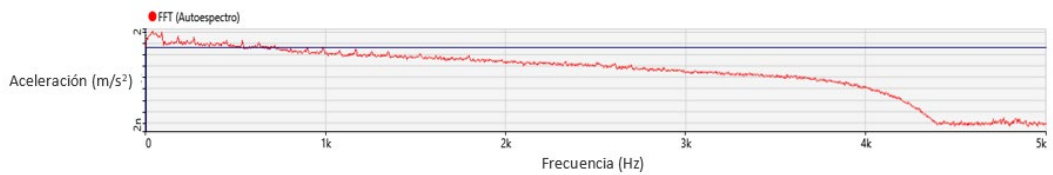
Eje X**Eje Y****Eje Z**

Figura 2. Variación de la aceleración ponderada en frecuencia en función de la frecuencia

En todos los ensayos realizados el aspecto de estas curvas es el mismo. Puede comprobarse como las mayores aceleraciones se producen en las frecuencias más bajas. Conforme se incrementa el valor de la frecuencia el valor de la aceleración disminuye lenta y progresivamente hasta que se alcanza la frecuencia de aproximadamente 4000 Hz, momento en el que se produce una disminución mucho más rápida de la aceleración hasta alcanzar una frecuencia de aproximadamente 4500 Hz, momento en el que la aceleración permanece muy constante.

En la figura 3 se muestra el valor de la aceleración ponderada en frecuencia en cada uno de los ejes en función del tiempo. Todos los ensayos realizados en probetas de escayola o mortero de cemento tienen un aspecto muy similar al de la figura. Puede comprobarse como los mayores valores de aceleración se producen en el eje z, que indica la dirección de avance del taladro percutor, mientras que en los otros dos ejes las aceleraciones son menores y muy similares entre sí.

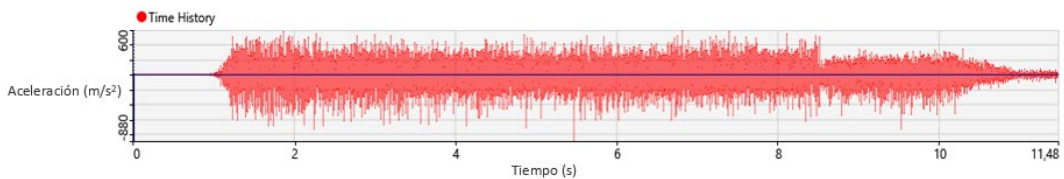
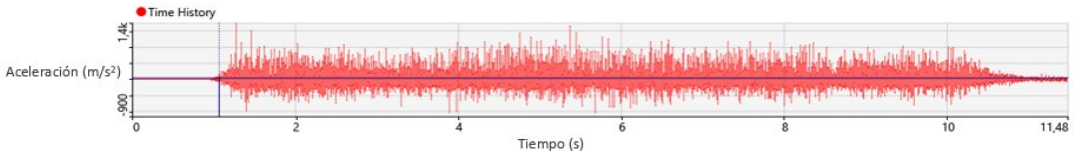
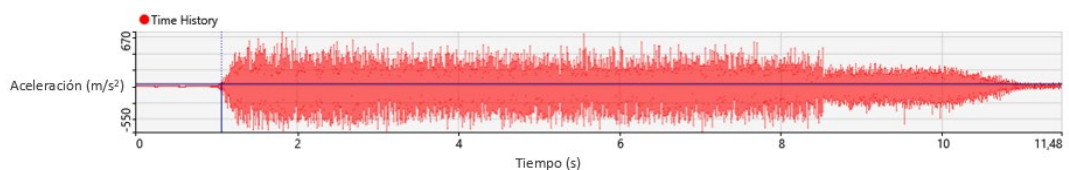
Eje X**Eje Y****Eje Z**

Figura 3. Valor de la aceleración ponderada en frecuencia en función del momento del ensayo

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados. En cada fila de la tabla se ofrecen los valores medios de los 4 ensayos realizados para cada tipo de ensayo. Se ha seguido un código en el cual el primer dígito indica el material sobre el que se ha actuado: P para la escayola, C para el mortero de cemento, B para el ladrillo revestido de escayola; los dos siguientes indican el tipo de martillo utilizado H1 o H2. La columna 3 muestra los valores de la aceleración de pico, la columna 4 muestra el valor de rms, en la columna 5 se indica el factor de cresta, en la columna 6 el tiempo necesario para alcanzar el valor que da lugar a una acción y en la última columna el tiempo para alcanzar el valor límite.

Tabla 3. Resultados obtenidos en los ensayos

Ensayo	T (s)	a_p (m/s ²)	a_v (m/s ²)	CF	2,5 m/s ² (h)	5 m/s ² (h)
PH1	6,8	58,8	6,8	5,7	1,1	4,3
PH2	5,3	68,1	12,7	4,5	0,3	1,2
CH1	15,2	65,3	9,0	7,3	0,6	2,5
CH2	8,6	95,1	10,5	9,1	0,5	1,8
BH1	7,4	53,0	7,7	7,7	0,8	3,4
BH2	4,5	138,0	14,8	14,8	0,2	0,9

En dos de los seis ensayos realizados, el factor de cresta (CF) supera el valor de 9, lo que indica la presencia de impactos significativos durante la operación de taladrado. Según la norma ISO 5349, en estos casos el método basado únicamente en el valor rms puede subestimar el riesgo real de exposición, ya que no refleja adecuadamente la naturaleza impulsiva de las vibraciones. Esta circunstancia sugiere la necesidad de emplear métodos complementarios de evaluación más sensibles a los picos de aceleración, tales como el análisis del contenido espectral, el uso de métricas basadas en aceleración de pico-pico, o incluso técnicas de evaluación energética por impulsos. Además, esta situación plantea interrogantes sobre la idoneidad de los métodos actualmente normalizados para herramientas de impacto y subraya la importancia de considerar parámetros adicionales en la caracterización del riesgo vibratorio, especialmente en contextos constructivos reales donde las condiciones operativas pueden amplificar estos efectos. La elección de procedimientos más completos permitiría una valoración más precisa del riesgo y, por tanto, una mejor orientación para la adopción de medidas preventivas eficaces.

La Directiva 2002/44/CE toma como referencia la norma ISO 5349-1 y establece el valor límite de exposición a las vibraciones en 5 m/s² y el valor que da lugar a la toma de acciones en 2,5 m/s². Introduciendo en la ecuación 1 los valores de a_v obtenidos, se pueden obtener los tiempos que podría estar un trabajador usando estos taladros percutores para no superar los valores de referencia de la Directiva (tabla 3). Puede comprobarse que el tiempo necesario para alcanzar el valor que da lugar a una acción es muy bajo, inferior a 1 hora en 5 de los 6 casos estudiados, lo que implica el alto riesgo de este tipo de operaciones. Por otra parte, el tiempo para alcanzar el valor límite es inferior a 2 horas en 3 de las 6 situaciones ensayadas.

El valor de aceleración declarado por el fabricante para el segundo martillo (11 m/s²) queda del lado de la inseguridad en los tres tipos de materiales/sistemas ensayados, donde se ha superado ampliamente este valor. Este hallazgo coincide con los resultados obtenidos por Rimell et al. (2008), quienes demostraron que las mediciones realizadas en condiciones simuladas de trabajo pueden arrojar valores de vibración significativamente superiores a los indicados por los fabricantes. Asimismo, Moschioni et al. (2011) pusieron de manifiesto la elevada variabilidad y las incertidumbres asociadas a las mediciones de vibración mano-brazo, subrayando la necesidad de considerar márgenes de seguridad más amplios y métodos de medición más representativos de las condiciones reales de uso. Los resultados de este estudio refuerzan dicha evidencia, mostrando que incluso en un entorno experimental controlado, las aceleraciones efectivas pueden exceder con creces los valores normativos y declarados, lo que implica un potencial subregistro del riesgo vibratorio en el ámbito laboral.

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos y de su análisis, se pueden enumerar las siguientes conclusiones:

Los valores experimentales de aceleración registrados para el segundo taladro percutor (modelo H2) superaron el valor de 11 m/s² declarado por el fabricante en dos de los tres materiales analizados, lo que

evidencia que la información técnica proporcionada no refleja adecuadamente el riesgo real de exposición en condiciones de uso representativas del entorno constructivo.

En todos los escenarios de ensayo, los tiempos estimados para alcanzar el valor de acción ($2,5 \text{ m/s}^2$) fueron inferiores o muy próximos a una hora, lo que confirma el alto nivel de riesgo asociado a estas operaciones y subraya la necesidad de limitar su duración, mejorar los métodos de control y planificar pausas preventivas adecuadas.

En dos de los seis ensayos realizados, el factor de cresta superó el valor de 9, lo que indica la presencia de vibraciones impulsivas significativas. Según la norma ISO 5349, esta condición requiere considerar métodos de evaluación alternativos al cálculo basado exclusivamente en el valor rms, con el fin de no subestimar los efectos reales de exposición y garantizar una caracterización más precisa del riesgo vibratorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bovenzi, M. (1998). Exposure-response relationship in the hand-arm vibration syndrome: an overview of current epidemiology research. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 71, 509–519. <http://dx.doi.org/10.1007/s004200050316>
- Bovenzi, M., Pinto, I. & Picciolo, F. (2019). Risk assessment of vascular disorders by a supplementary hand-arm vascular weighting of hand-transmitted vibration. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 92, 129–139. <https://doi.org/10.1007/s00420-018-1363-y>
- Burdorf, A. & Monster, A. (1991). Exposure to vibration and self-reported health complaints of riveters in the aircraft industry. *The Annals Occupational Hygiene*, 35(3), 287–298. <https://doi.org/10.1093/annhyg/35.3.287>
- RG Dong, R. G., Sinsel, E. W., Welcome, D. E., Warren, C., Xu, X. S., McDowell, T. W. & Wu, J. Z. (2015). Review and evaluation of hand-arm coordinate systems for measuring vibration exposure, biodynamic responses and hand forces. *Safety and Health at Work*, 6(3) pp 159-173 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2015.05.003>
- Gemne, G. (1997). Diagnostics of hand-arm system disorders in workers who use vibrating tools. *Occupational & Environmental Medicine*, 54(2), 90–95. <https://doi.org/10.1136/oem.54.2.90>
- Griffin, M. J. (1990). *Handbook of Human Vibration*. Academic Press, London.
- Heaver, C., Goonetilleke, K. S., Ferguson, H., & Shiralkar, S. (2011). Hand-Arm vibration syndrome: a common occupational hazard in industrialized countries. *Journal of Hand Surgery (European Volume)*, 36(5), 354-363. <https://doi.org/10.1177/1753193410396636>
- ILO. (2011). Hand-Transmitted Vibration. Encyclopaedia of Occupational Health & Safety. <https://iloencyclopaedia.org/part-vi-16255/vibration/item/789-hand-transmitted-vibration>
- Maeda, S., Taylor, M. D., Anderson, L. C., & McLaughlin, J. (2019). Determination of hand-transmitted vibration risk on the human. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 70, 28-37. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.01.002>
- Mahbad, M. H., & Noriaki, H. (2011). Review of different Quantification Methods for the Diagnosis of Digital Vascular Abnormalities in Hand-Arm Vibration Syndrome. *Journal of Occupational Health*, 53(4), 241-249. <https://doi.org/10.1539/joh.10-0030-ra>
- Malchaire, J., Piette, A. & Cock, N. (2001). Associations between hand-wrist musculoskeletal and sensorineural complaints and biomechanical and vibration work constraints. *The Annals of Occupational Hygiene*, 45, 479-491. [https://doi.org/10.1016/s0003-4878\(00\)00084-3](https://doi.org/10.1016/s0003-4878(00)00084-3)
- Moschioni, G., Saggin, B., & Tarabini, M. (2011). Prediction of data variability in hand-arm vibration measurements. *Measurement*, 44(9), 1679-1690, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.06.022>
- NIOSH. (1983). *Current Intelligence Bulletin 38 – Vibration Syndrome*. Publication Number 83-110. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/83-110/>
- NIOSH (1997). Musculoskeletal Disorders and Workplace Factors - a Critical Review of Epidemiological Evidence for Work-related Musculoskeletal Disorders of the Neck, Upper Extremity, and Low Back. DHHS (NIOSH). Publication Number 97-141. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/97-141/default.html>
- Rimell, A. N., Notini, L., Mansfield, N. J., & Edwards, D. J. (2008). Variation between manufactures' declared vibration emission values and those measured under simulated workplace conditions for a range of hand-held power tools typically found in the construction industry. *International Journal Industrial Ergonomics*, 38(9), 661-675. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2007.10.023>
- Taylor, W. (1988). Biological effects of the hand-arm vibration syndrome: historical perspectives and current research. *Journal of Acoustics Society of America*, 83, 415-422. <https://doi.org/10.1121/1.396191>
- Weier, M. H. (2020). The Association Between Occupational Exposure to Hand-Arm Vibration and Hearing Loss: A Systematic Literature Review. *Safety and Health at Work*, 11(3), 249-261. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2020.04.003>

Yu, Z. S., Chao, H., Qiao, L., Qian, D. S. & Ye, Y.H. (1986). Epidemiologic survey of vibration syndrome among riveters, chippers and grinders in the railroad system of the People's republic of China. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 12(4), 289-292. <https://doi.org/10.5271/sjweh.2150>