

Vibraciones de herramientas manuales y prevención de lesiones traumáticas por repetición (CTD's)

SUMARIO

Las vibraciones producidas por máquinas manuales que se transmiten al sistema mano-brazo son un factor de riesgo potencial relacionado con los CTD's. La adecuada elección de las herramientas puede contribuir a disminuir en gran medida los efectos de las vibraciones sobre el hombre, además de evitar esfuerzos, y reducir el factor de riesgo de CTD's. Se presentan los niveles de vibración producidos por distintas herramientas manuales y la medida de la sensibilidad vibrotáctil de la mano como método no invasivo de detección precoz del síndrome del túnel carpiano.

JOSÉ MANUEL ÁLVAREZ
Instituto de Ergonomía MAPFRE, S. A

JOSÉ M.ª PÉREZ LACORZANA
Brüel & Kjaer Ibérica, S. A

AURELIO GÓMEZ GÓMEZ
General Motors España, S. A

INTRODUCCIÓN

Si bien se han conseguido grandes avances en el diseño de herramientas, útiles y equipos, aún existen diferencias significativas en cuanto a las prestaciones ofrecidas, tanto en

Palabras clave: Vibraciones, herramientas, mano, dedos blancos, túnel carpiano, lesiones, «Cumulative», «Trauma», «Disorders», «CTD's».

los aspectos ergonómicos de diseño como en las condiciones de seguridad.

La importancia creciente en las lesiones traumáticas por repetición o *Cumulative Trauma Disorders* (CTD's) obliga a prestar una especial atención en la elección de los medios de trabajo y elaboración, como es el caso de las herramientas manuales.

En el presente artículo mostramos los niveles de vibración de distintas herramientas manuales obtenidos en campo y en condiciones reales de uso. Las mediciones corresponden a operaciones de desbastado, lijado y pulido de superficies metálicas con máquinas eléctricas, ensayos destructivos de materiales utilizando escoplos neumáticos y montaje de bulones con atomilladores eléctricos y neumáticos.

Asimismo se incluyen algunos resultados obtenidos mediante la determinación de la sensibilidad vibratóctil de la mano. Éste es un método no invasivo para la detección precoz del síndrome del túnel carpiano.

¿QUÉ SON LOS CUMULATIVE TRAUMA DISORDERS (CTD's)?

El término *Cumulative* indica que la lesión se desarrolla gradualmente en un período, que puede variar desde semanas hasta algunos años, como resultado de la sollicitación repetida de una determinada parte del cuerpo. El término acumulativo está

basado en la teoría de que cada repetición de una actividad produce algún trauma o deterioro y desgaste de los tejidos y articulaciones del cuerpo. La palabra **trauma** significa lesión corporal por sollicitación mecánica. Y **disorder** se refiere a una enfermedad física o condición anormal.

Los CTD's son problemas de salud considerados como enfermedad laboral, puesto que estas patologías son más frecuentes entre los trabajadores que en la población en general.

Existen factores de riesgo que pueden «potenciar» o contribuir en estas enfermedades. Un factor de riesgo es cualquier atributo, experiencia o exposición que incrementa la probabilidad de ocurrencia de una lesión, aunque no es, necesariamente, el factor causal.

Los factores de riesgo más comunes causantes de CTD's se observan como resultado de procedimientos repetitivos y forzados, carga muscular estática, posturas corporales, sollicitación mecánica, exposición al frío y vibraciones.

VIBRACIONES EN EL SISTEMA MANO-BRAZO

Las vibraciones que afectan al sistema mano-brazo son causadas, en general, por el uso de herramientas manuales. Las vibraciones inducidas y sus síntomas se denominan gené-

ricamente «síndrome de vibración mano-brazo» (HAVS: *Hand-Arm Vibration Syndrome*).

La utilización de herramientas con altos niveles de vibración, durante períodos prolongados, es un factor de riesgo que puede producir estas patologías. Se trata principalmente de lesiones vasculares, nerviosas, esqueléticas y articulares.

En la patología osteoarticular intervienen fenómenos mecánicos y traumáticos directos sobre las superficies óseas y fenómenos neuromusculares indirectos de hipovascularización local, los que se combinan para provocar esas alteraciones.

Las lesiones vasculares se producen fundamentalmente en las paredes de los vasos de arterias periféricas, particularmente en los dedos, causando una vasoconstricción y, por tanto, afectando el riego sanguíneo. Estas lesiones se conocen como fenómeno de Raynaud, «dedos blancos», VWF (*Vibration White Fingers*) y TVD (*Traumatic Vasopatic Disease*).

Las vibraciones y la exposición al frío representan las principales causas profesionales del fenómeno de Raynaud. Esta lesión se presenta como una modificación en la coloración de los dedos, acompañada de un disfuncionamiento neurológico local transitorio, cuya principal manifestación es una hipoestesia (pérdida de sensibilidad) con sensación de «dedo muerto». Afectan de manera asimétrica, con predominio sobre la



Ensayo destructivo de materiales con escoplo neumático.

mano que soporta el peso o realiza el mayor esfuerzo.

La patología osteoarticular del miembro superior se relaciona con el uso de herramientas que producen vibraciones cuya frecuencia dominante es inferior a 40 Hz (a menor frecuencia mejor se transmite la vibración). Altos niveles de vibración a baja frecuencia y esfuerzos musculares importantes pueden causar desgaste superficial en las articulaciones. Vibraciones de tipo impacto pueden producir microfisuras óseas e interferir en la normal nutrición de las articulaciones.

Las lesiones óseas más frecuentes son:

- Lesiones artrósicas a nivel de codo, hombro, muñeca (túnel carpiño, por ejemplo) y, a veces, del pulgar.
- Necrosis aseptica del semilunar (enfermedad de Kienbock).
- Fractura traumática del escafoides con formación de pseudoartrosis (enfermedad de Köhler).
- Quistes óseos o vasculares (Geodas).
- Modificaciones periostales.
- Tenosinovitis y afecciones osteo-ligamentosas.

MEDIDA DE LA EXPOSICIÓN HUMANA A VIBRACIONES

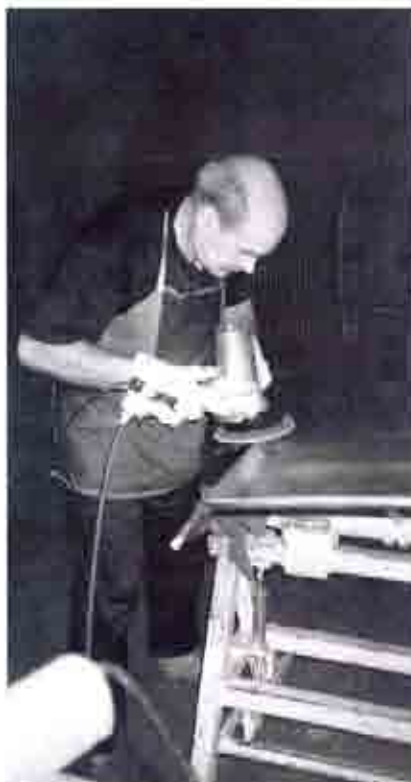
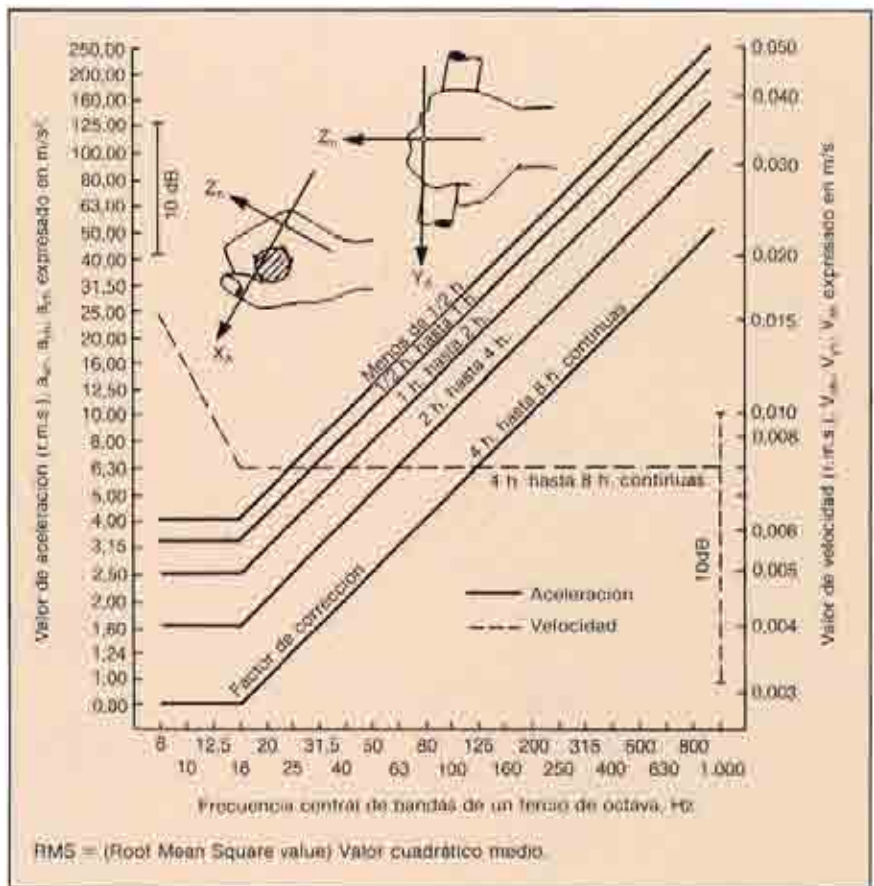
Existen cuatro factores físicos medibles que deben determinarse para evaluar la reacción humana frente a las vibraciones: amplitud, frecuencia, tiempo de exposición y dirección de aplicación.

Para el sistema mano-brazo, la respuesta en frecuencia es la misma en todas direcciones. La norma ISO 5349 reúne los conocimientos actuales para poder evaluar el riesgo potencial de exposición en función de los niveles medidos (Figuras 1 y 2).

El rango de frecuencias para el cual está definida esta norma es de 6,3 a 1.250 Hz. En ella se presentan las curvas de exposición para medidas realizadas con filtros por bandas de octavas o tercios de octavas.

Un método alternativo es el método de **ponderación**. Conceptualmente es igual que las mediciones de ruido en dB(A). Consisten en utilizar un instrumento de medición que tiene incorporada una red de ponderación en frecuencia (filtro) con una curva de atenuación inversa a la curva de exposición especificada en la norma (Figura 3). Así se tiene un único valor, denominado nivel de aceleración compensado, que posterior-

FIGURA 1.



Lijado de techo con herramienta eléctrica vertical.

mente se compara con los niveles especificados en la norma para las frecuencias más sensibles.

Las unidades utilizadas para la medida de vibraciones son las de aceleración eficaz en m/s², o bien el dB (decibel) con respecto a una aceleración de referencia.

$$a_{ef} [dB] = 20 \log |a/a_0|$$

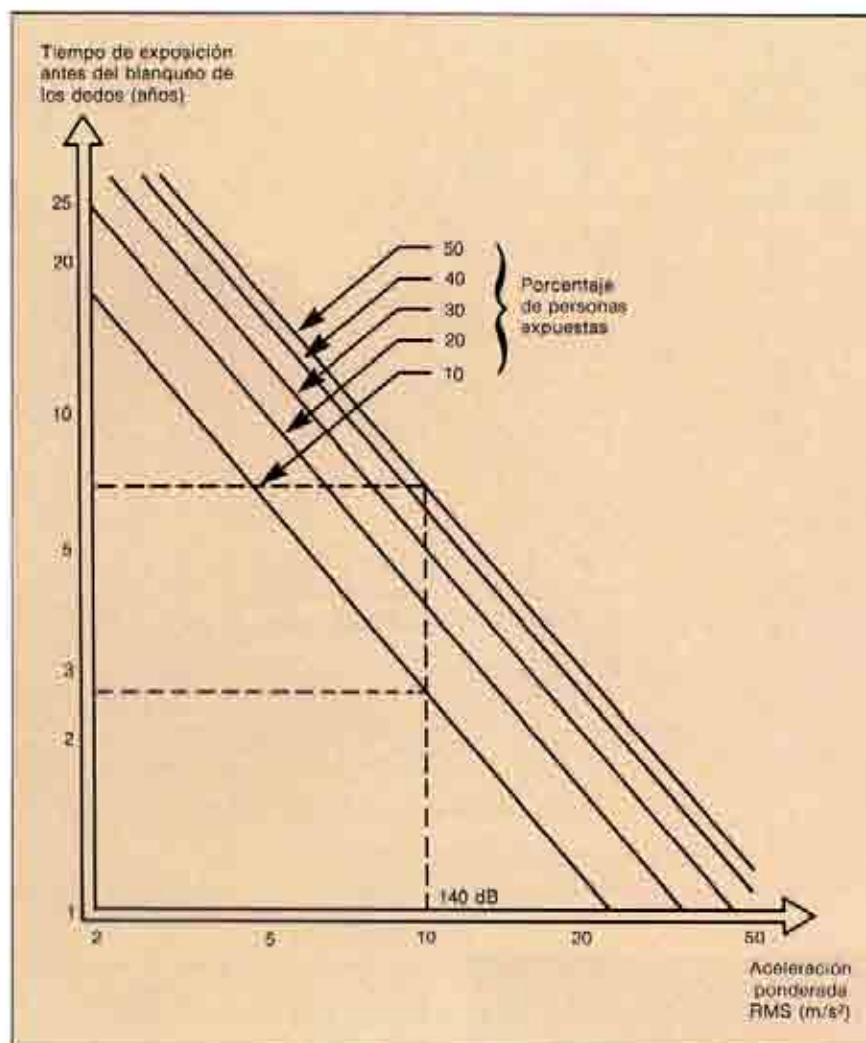
donde:

$$a = \text{Valor eficaz (RMS) de la aceleración en m/s}^2$$

$$a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$$

Las investigaciones realizadas últimamente han demostrado que cuando el espectro de la vibración está formado por varios componentes, o bien es de banda ancha, el método de ponderación ofrece una muy buena aproximación. El valor ponderado es, principalmente, recomendado para comparar con valores ponderados totales de otras vibraciones. En la mayor parte de los casos prácticos, la diferencia entre el método detallado de evaluación mediante los límites en bandas de tercios de octava con respecto al de mediciones totales ponderadas es reducida. Más aún, el método de ponderación puede dar

FIGURA 2



Los límites de exposición citados por las normas son de aplicación inmediata cuando la vibración es continua durante el período considerado. Si la amplitud eficaz de aceleración varía apreciablemente con el tiempo, o si la exposición está compuesta por varios periodos individuales (t_i) a diferentes niveles (a_i), deberá obtenerse la «exposición total equivalente» de forma semejante a como se calcula la dosis de ruido.

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

Exposición equivalente = $\sum [t_i / T_i] 100$

t_i = tiempo de exposición al nivel i ,
 T_i = tiempo máximo de exposición al nivel i ,
 T = tiempo de exposición,
 $a(t)$ = valor instantáneo de aceleración.

La exposición equivalente deberá ser menor a 100 para estar dentro del límite de exposición permitido.

INSTRUMENTACIÓN Y MÉTODO

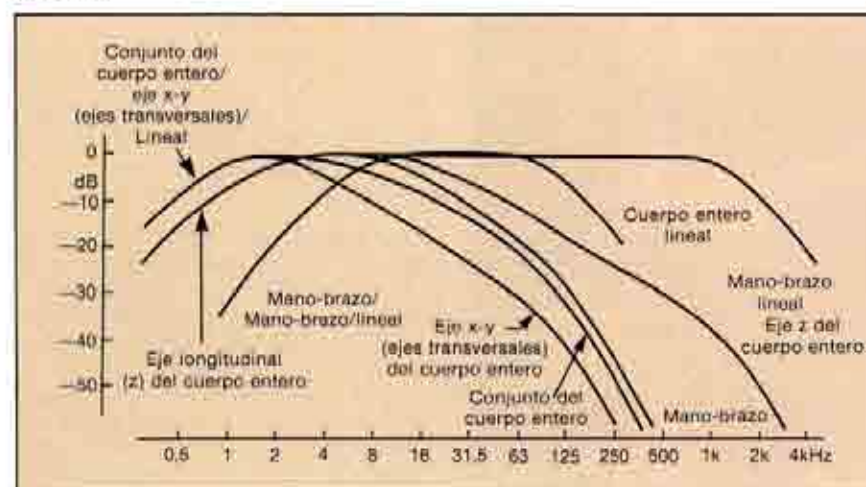
Los niveles de aceleración en las distintas operaciones fueron recogidos utilizando el medidor Brüel & Kaer 2231 con el módulo BZ 7105 y la unidad de vibraciones 2522. Los espectros en frecuencias fueron obtenidos con el analizador de espectros 7667. Para la medición de las vibraciones que afectan al sistema mano-brazo se empleó el sistema de coordenadas biomecánico de la mano (Figura 4), según la norma ISO 5349. Se obtuvieron niveles de vibración sobre los tres ejes (a_x , a_y y a_z) mediante el set de transductores Brüel & Kjaer 4392 con acelerómetros miniatura 4372. Para efectuar las mediciones de campo, y de acuerdo con el Departamento de Seguridad e Higiene de G.M.E., se seleccionaron una serie de puestos de trabajo en los que se utilizan herramientas portátiles eléctricas y neumáticas, efectuándose las mediciones en situación normal de trabajo.

La sensibilidad vibrotáctil de la mano se determinó al comienzo y al final de la jornada de trabajo con el sistema de vibrometría Brüel & Kjaer 9627. Se trata de un método no invasivo para la detección precoz del síndrome del túnel carpiano y que permite establecer un indicador denominado «Total Jetzer Index».

RESULTADOS

En la tabla I se indican los niveles de aceleración pico (P_{max}), máximos

FIGURA 3



por resultado una evaluación demasiado estricta de los efectos de la vibración.

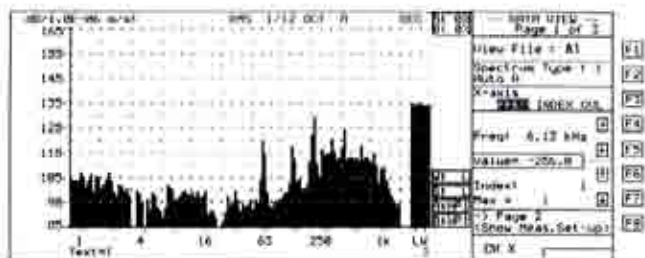
En el caso de señales continuas o muy repetitivas, se propone un pro-

cedimiento en el cual el espectro de la vibración en cada eje se pondera para obtener el valor ponderado total, según la siguiente expresión:

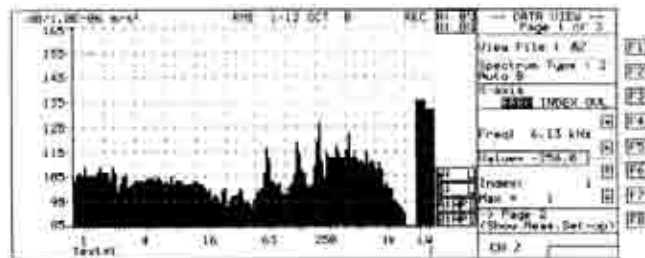
$$a = [(1.4 a_x)^2 + (1.4 a_y)^2 + a_z^2]^{1/2}$$



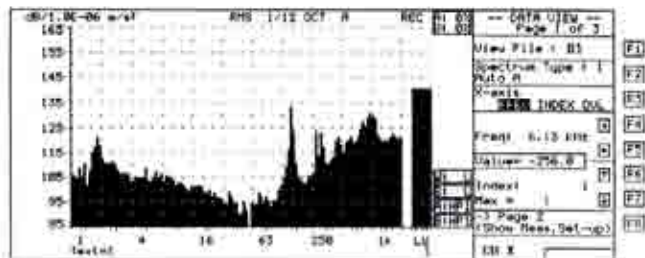
TYPE 7667



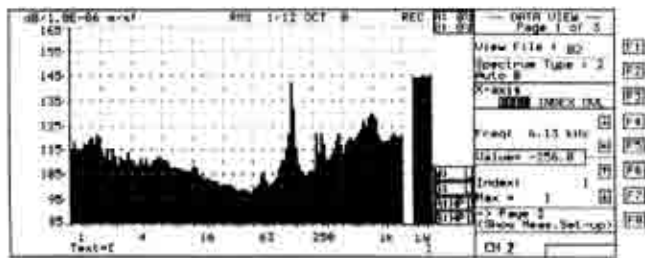
TYPE 7667



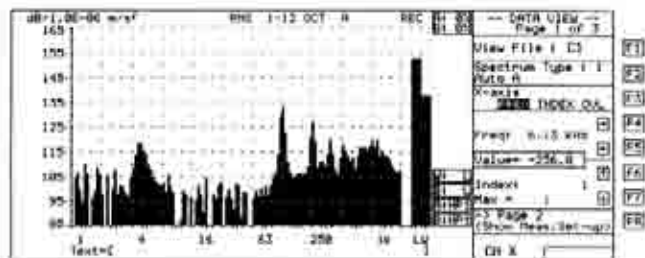
TYPE 7667



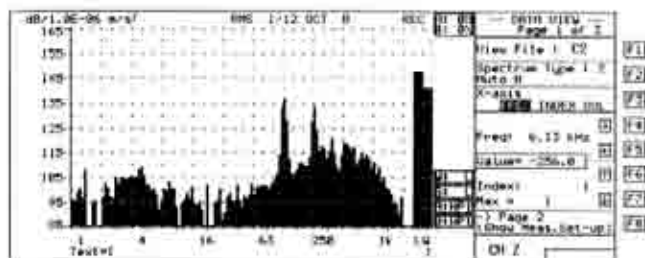
TYPE 7667



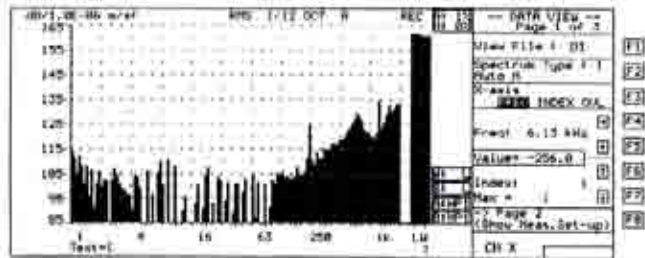
TYPE 7667



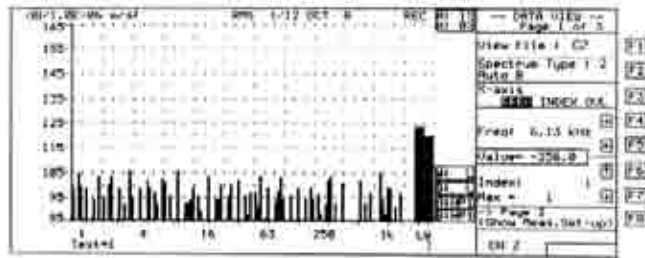
TYPE 7667



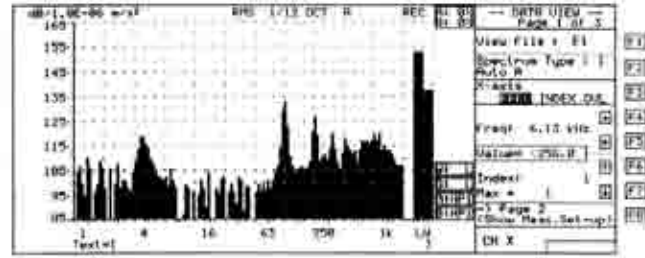
TYPE 7667



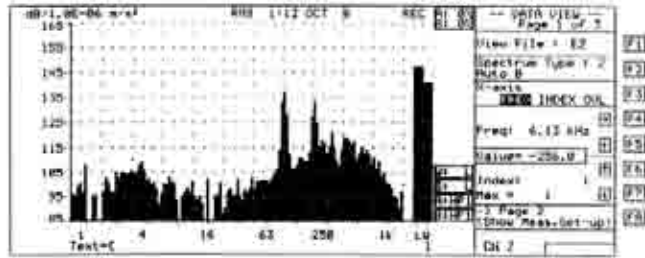
TYPE 7667



TYPE 7667



TYPE 7667



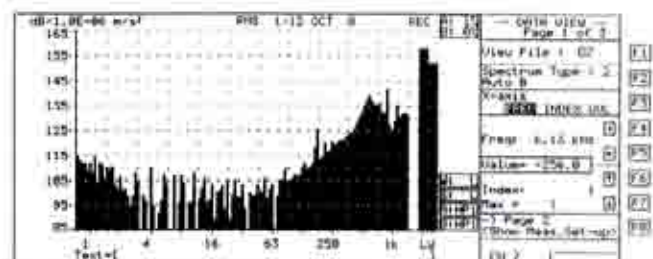
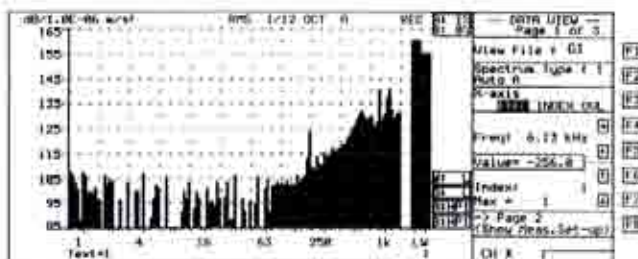
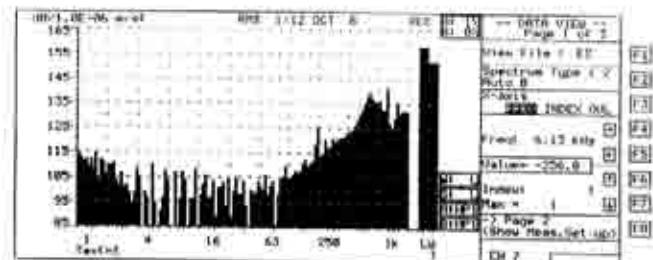
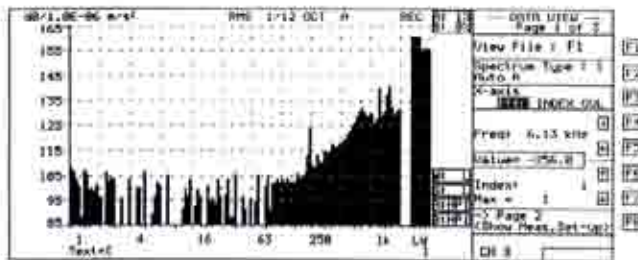
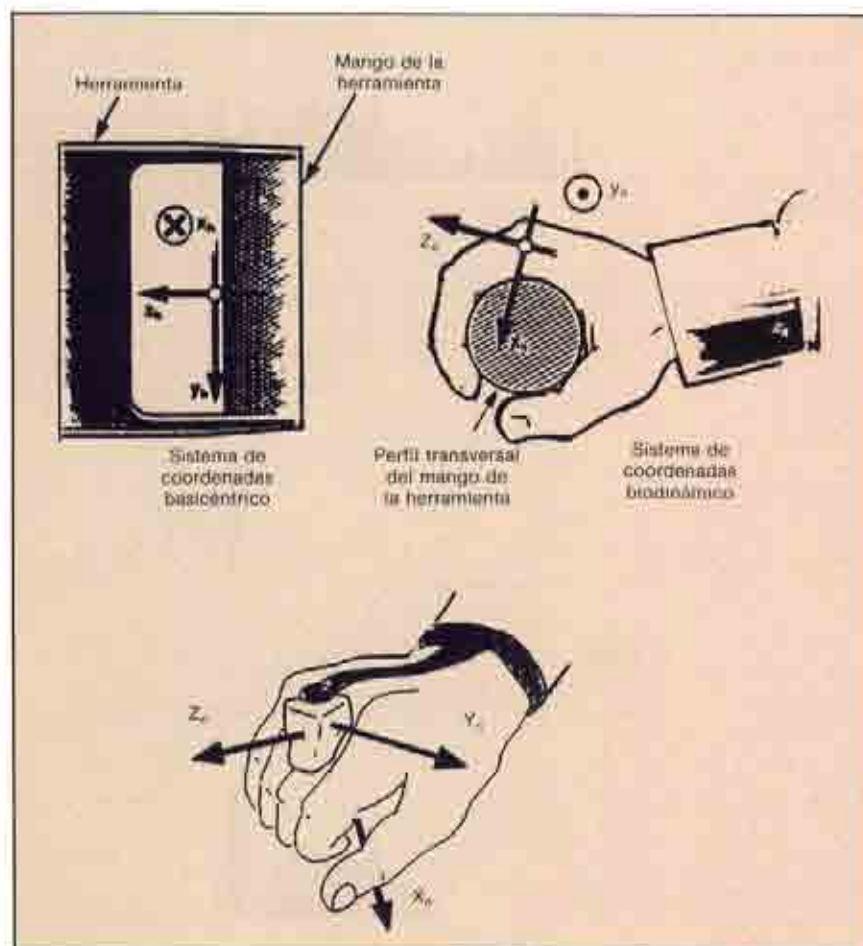


FIGURA 4



($L_{m\acute{a}x}$), mínimos ($L_{m\acute{i}n}$), equivalentes (A_{eq}), obtenidos en cada eje (X, Y, Z) durante la ejecución de las diferentes operaciones, y de aceleración combinada (SUM), expresados en términos de aceleración eficaz ponderada ($HA:WT$) y medidos sobre la mano dominante. También se indican los espectros en frecuencia, en la dirección de los ejes X y Z, correspondientes a cada herramienta evaluada y el tiempo de duración de cada medición (T_{med}).

Las medidas de sensibilidad vibrotáctil de la mano se efectuaron en laboratorio, al comienzo y al final de la jornada de trabajo, sobre la mano dominante. Como método no invasivo para la detección precoz del síndrome del túnel carpiano se estableció el «Total Jetzer Index» y la sensibilidad en el rango de frecuencias de 8 a 500 Hz (en bandas de octavas), con el sistema de vibrometría Bruel & Kjaer 9627. Los tests corresponden a seis trabajadores que efectúan operaciones de desbastado, lijado y pulido de superficies metálicas, ensayos destructivos de materiales y montaje de piezas, con una experiencia media de cinco años. Los resultados obtenidos se recogen en la figura 7 y representan la medida de sensibilidad vibrotáctil en las siguientes operaciones:

— Lijado y pulido de superficies metálicas (acabado final).

- Lijado y pulido de superficies metálicas (retrabajo).
- Ensayo destructivo de materiales.
- Desbarbado de superficies metálicas (matricería).
- Fijación de barras y ejes (montaje final).
- Fijación de barras y ejes (montaje final).

DISCUSIÓN

Una vez obtenidos los niveles de aceleración en condiciones reales de trabajo y conocida la frecuencia de operación y, así como la duración de la tarea, es posible calcular la aceleración y la exposición total equivalente según la norma ISO 5349 o aplicar la propuesta de directiva CE (Doc. 4578/91/IES). Estos valores seguramente diferirán de los niveles de vibración de cada herramienta obtenidos a partir de la norma ISO 8662. La intensidad de la exposición a las vibraciones variará de acuerdo a la tarea, técnica de operación, aplica-

La importancia creciente en las lesiones traumáticas por repetición (CTD's) obliga a prestar una especial atención en la elección de los medios de trabajo y elaboración, como es el caso de las herramientas manuales.

Las CTD's son problemas de salud considerados como enfermedad laboral, puesto que estas patologías son más frecuentes entre los trabajadores que en la población en general.

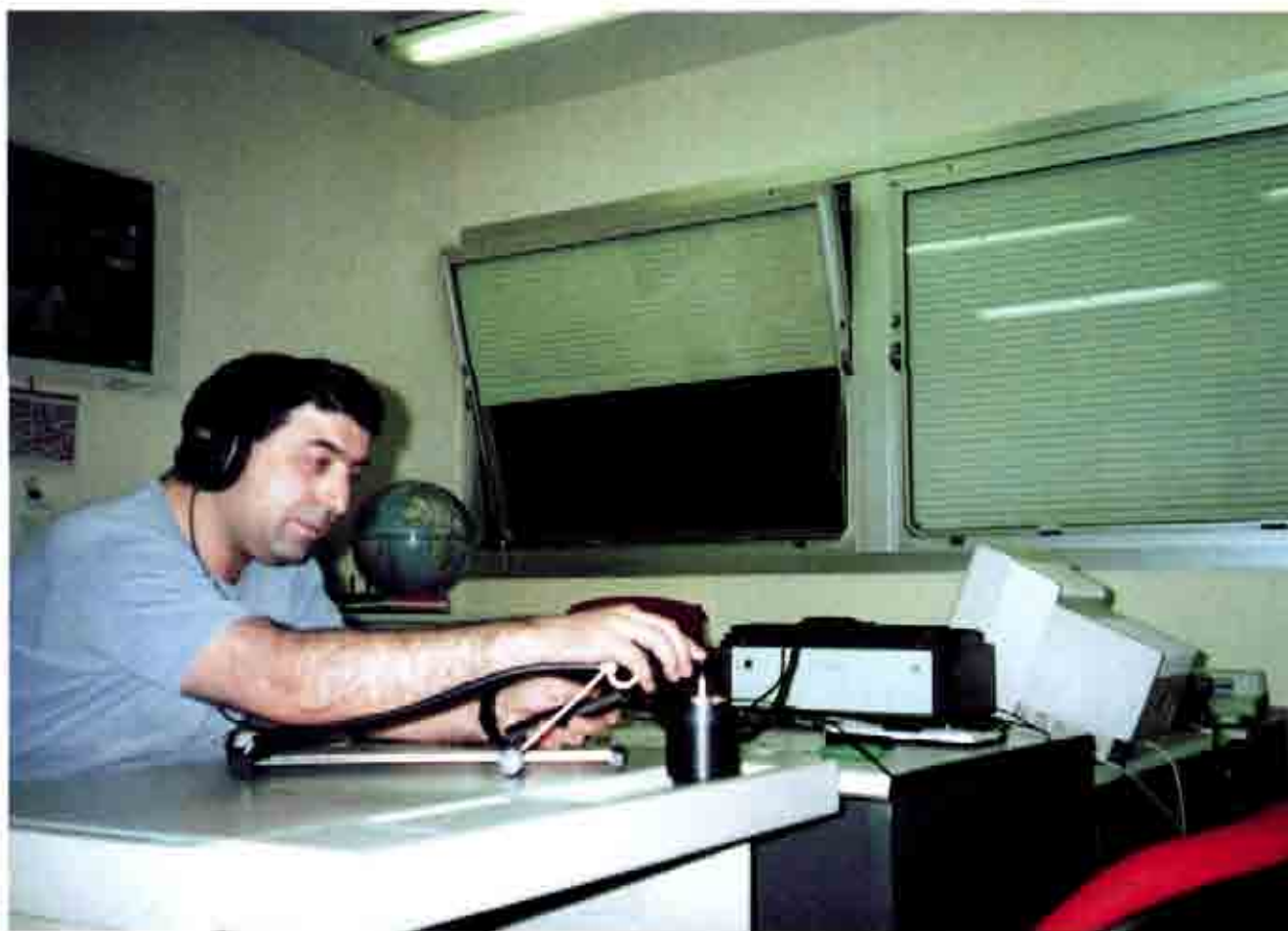
TABLA I. Niveles obtenidos de aceleración eficaz ponderada (m/s²).

Operación/Herramienta	Eje	P _{máx}	L _{máx}	A _{eq}	L _{mín}	T _{med}
Lijado de superficie metálica (techo)	X	3,78	1,29	0,57	0,42	0'24"
	Y	8,20	4,02	0,75	0,34	
	Z	6,52	2,17	0,78	0,40	
	SUM	—	—	1,23	—	
Herramienta: Lijadora eléctrica (espectros A1 y A2)	X	18,70	4,24	1,09	0,44	1'10"
	Y	11,60	2,50	0,84	0,50	
	Z	10,30	2,68	0,92	0,52	
	SUM	—	—	1,65	—	
Lijado de superficie metálica (techo)	X	18,70	4,24	1,09	0,44	1'10"
	Y	11,60	2,50	0,84	0,50	
	Z	10,30	2,68	0,92	0,52	
	SUM	—	—	1,65	—	
Herramienta: Lijadora eléctrica (espectros A1 y A2)	X	6,60	1,37	0,84	0,16	0'22"
	Y	27,80	4,10	2,84	0,38	
	Z	10,70	2,62	1,92	0,41	
	SUM	—	—	3,54	—	
Pulido de superficie metálica (techo)	X	97,6	2,84	1,27	0,62	1'10"
	Y	54,40	2,20	1,20	0,69	
	Z	91,20	2,44	1,44	0,94	
	SUM	—	—	2,28	—	
Herramienta: Pulidora eléctrica (espectros B1 y B2)	X	9,90	4,34	2,20	0,10	1'49"
	Y	13,70	5,56	2,64	0,18	
	Z	12,30	6,60	2,52	0,14	
	SUM	—	—	4,30	—	
Ciclo de lijado y pulido de superficie metálica (techo)	X	131	2,78	0,95	0,52	2'02"
	Y	171	4,66	2,78	0,28	
	Z	118	3,42	1,39	0,85	
	SUM	—	—	3,26	—	
Herramientas: Lijadora y pulidora eléctricas	X	33,00	10,70	2,88	0,61	2'18"
	Y	56,80	11,00	3,96	0,73	
	Z	37,40	7,50	2,88	0,45	
	SUM	—	—	5,76	—	
Desbarbado de superficie metálica (trabajar postizo)	X	31,80	6,24	2,36	0,73	2'44"
	Y	36,20	8,32	3,46	1,02	
	Z	31,20	7,56	2,50	0,68	
	SUM	—	—	4,88	—	
Herramienta: Desbarbadora eléctrica (espectros C1 y C2)	X	33,00	10,70	2,88	0,61	2'18"
	Y	56,80	11,00	3,96	0,73	
	Z	37,40	7,50	2,88	0,45	
	SUM	—	—	5,76	—	
Ensayo destructivo de materiales	X	31,80	6,24	2,36	0,73	2'44"
	Y	36,20	8,32	3,46	1,02	
	Z	31,20	7,56	2,50	0,68	
	SUM	—	—	4,88	—	
Herramienta: Escoplo neumático (espectros D1 y D2)	X	18,90	6,00	2,50	0,30	1'34"
	Y	35,40	5,12	2,33	0,33	
	Z	24,40	5,24	2,28	0,30	
	SUM	—	—	4,16	—	
Ciclo de lijado y pulido de superficie metálica (acabado de puerta)	X	20,10	8,40	2,88	0,16	3'06"
	Y	34,60	6,92	2,56	0,32	
	Z	18,90	5,12	1,73	0,25	
	SUM	—	—	4,24	—	
Herramientas: Lijadora y pulidora eléctricas	X	33,00	10,70	2,88	0,61	2'18"
	Y	56,80	11,00	3,96	0,73	
	Z	37,40	7,50	2,88	0,45	
	SUM	—	—	5,76	—	

TABLA I. Niveles obtenidos de aceleración eficaz ponderada [m/s²].

Operación/Herramienta	Eje	P _{máx}	L _{máx}	A _{eq}	L _{min}	T _{med}
Fijación de barra (suspensión delantera) Herramienta: Atornillador eléctrico (par = 21 Nm) (espectros E1 y E2)	X	26,80	4,66	2,90	0,42	0'17"
	Y	48,20	6,62	4,10	0,30	
	Z	50,40	6,28	3,78	0,58	
	SUM	—	—	6,36	—	
Fijación de barra (suspensión delantera) Herramienta: Atornillador eléctrico (par = 21 Nm) (espectros E1 y E2)	X	22,80	4,30	2,94	1,14	0'17"
	Y	41,00	6,08	3,96	1,75	
	Z	52,80	5,80	3,66	1,52	
	SUM	—	—	6,24	—	
Fijación eje trasero (lado izquierdo) Herramienta: Atornillador neumático #1 (par = 20 Nm) (espectros F1 y F2)	X	26,40	2,80	0,92	0,11	0'49"
	Y	29,80	4,24	1,31	0,11	
	Z	33,40	5,76	1,56	0,15	
	SUM	—	—	2,25	—	
Fijación eje trasero (lado derecho) Herramienta: Atornillador neumático #2 (par = 20 Nm) (espectros G1 y G2)	X	20,50	3,58	1,22	0,24	0'52"
	Y	43,40	4,76	1,73	0,27	
	Z	31,20	4,60	1,85	0,31	
	SUM	—	—	2,80	—	

Las vibraciones que afectan al sistema mano-brazo son causadas, en general, por el uso de herramientas manuales. Las vibraciones inducidas y sus síntomas se denominan genéricamente "síndrome de vibración mano-brazo".



Prueba de sensibilidad vibrotáctil.

GRÁFICO 8A

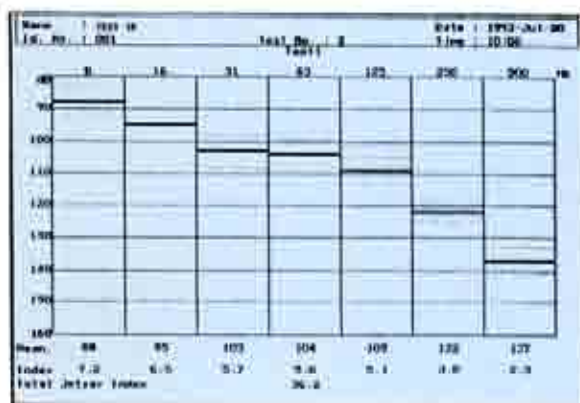
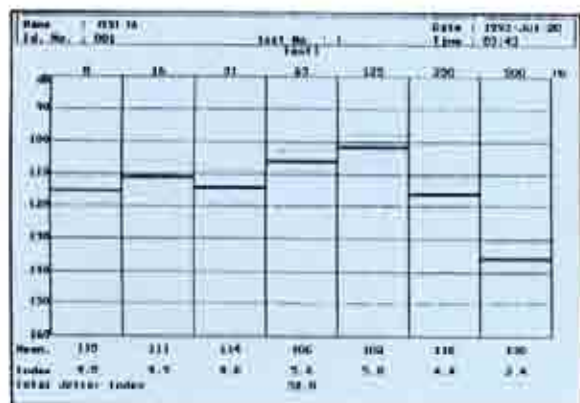


GRÁFICO 8B

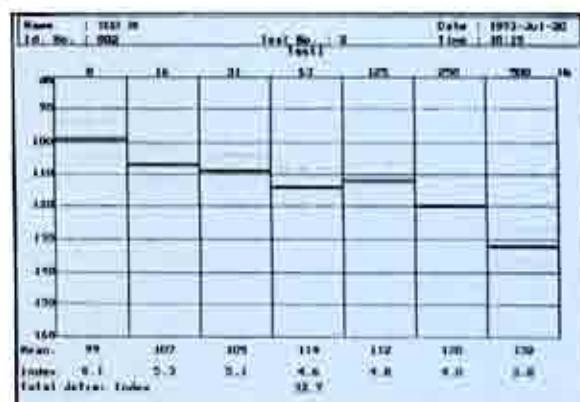
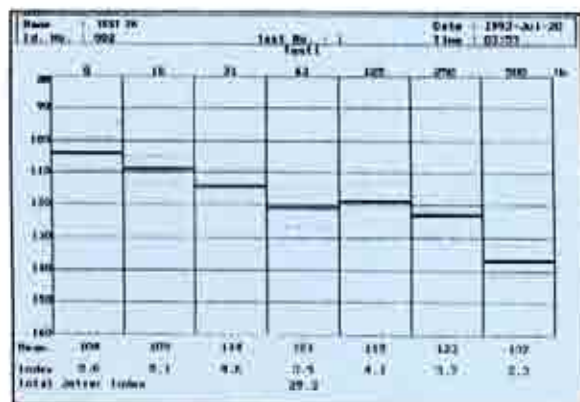


GRÁFICO 8C

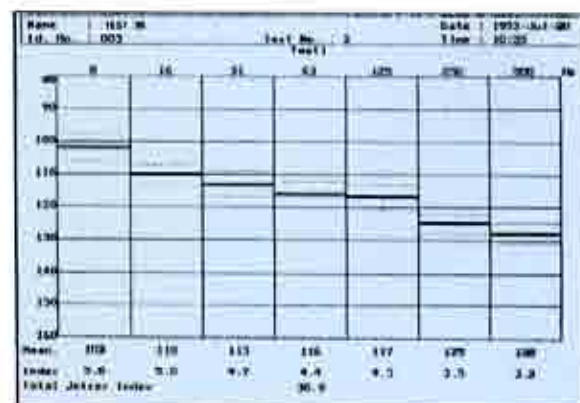
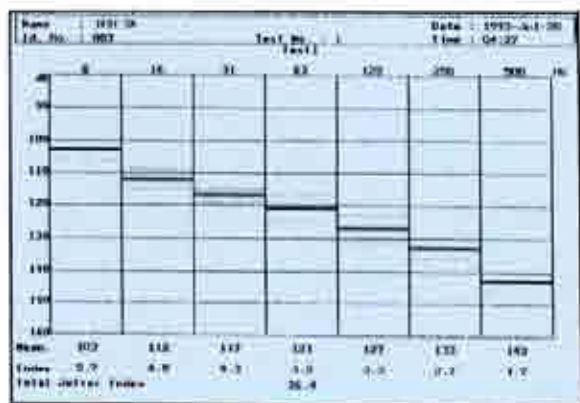


GRÁFICO 8D

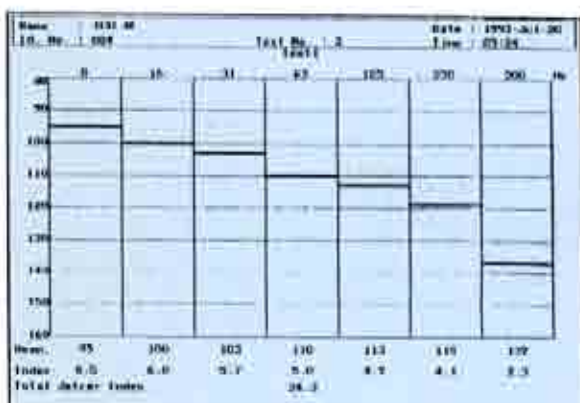
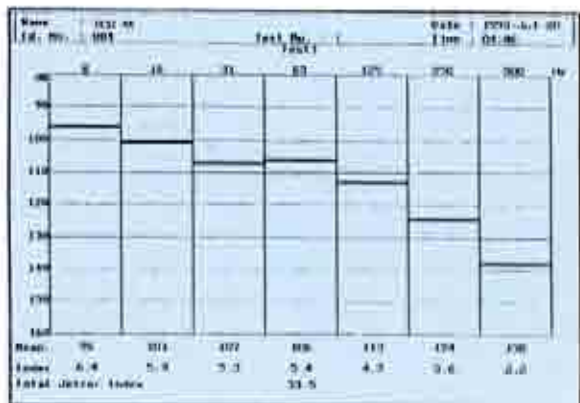


GRÁFICO 8E

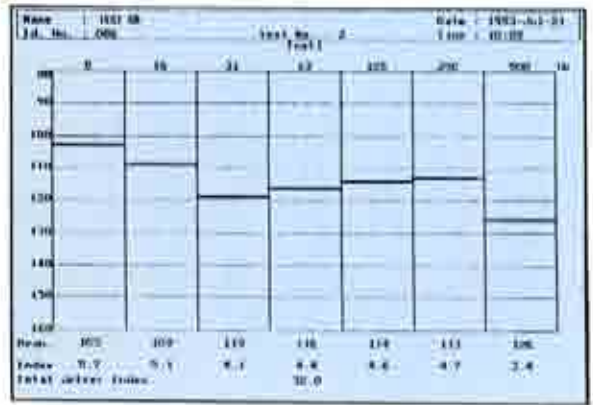
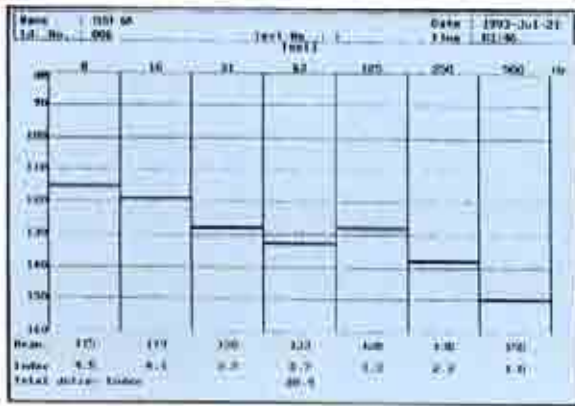
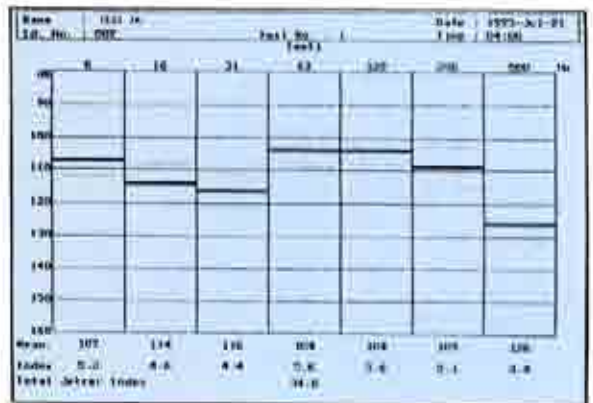
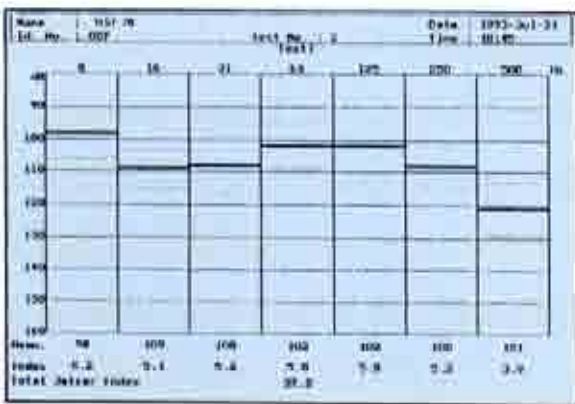


GRÁFICO 8F



ción de fuerza, modo de sujeción, ángulos y movimientos de muñeca, hombro y codo, etc. No sólo un buen diseño, sino también una adecuada elección y un apropiado uso de la herramienta podrán contribuir a disminuir considerablemente la exposición a vibraciones.

Es razonable suponer que los efectos biológicos pueden depender de la energía transmitida a la mano. Esta energía dependerá del acoplamiento mano-brazo/fuente de vibración y, consecuentemente, de la presión aplicada sobre la pieza vibrante, así como de la magnitud y dirección de la fuerza estática. El acoplamiento a la máquina y estos factores pueden afectar considerablemente la exposición a vibraciones.

El control de las vibraciones en máquinas manuales estará determinado por el adecuado diseño de la herramienta, incorporando principios ergonómicos, minimizando el nivel de vibración producido y el peso del útil, así como mejorando las superficies de agarre (*grip*) y favoreciendo la aplicación de la fuerza en la *interface* herramienta-pieza.

Otras prácticas de control incluirán

Para efectuar las mediciones de campo se seleccionaron una serie de puestos de trabajo en los que se utilizan herramientas portátiles eléctricas y neumáticas, efectuándose las mediciones en situación normal de trabajo.

La transmisión más favorable de fuerza resulta cuando el antebrazo mantiene una posición en línea recta, siempre que no se tenga que angular la muñeca o rotar el antebrazo.

el entrenamiento del personal, la selección de procedimientos, la utilización de elementos de protección, etc.

Como elementos de protección se dispone de guantes y muñequeras, pero aún se desconoce con precisión la atenuación que puede lograrse mediante su utilización.

En lo que respecta al diseño del «agarre», la clase más favorable y más segura para manejar la máquina es el «agarre de abarcar» (Figura 5). En algunos casos, la segunda mano se usa solamente para coger (mano de sustentación), a pesar de que sería posible una segunda asa.

La palma de la mano que realiza el manejo tiene que abarcar el asa con la mayor superficie posible. Toda la palma debería estar en contacto con el asa (Figura 6). El coeficiente de rozamiento, es decir, el contacto entre la mano y el asa, ejerce una influencia tanto en la transmisión de fuerza como de vibraciones.

La transmisión más favorable de fuerza resulta cuando antebrazo-brazo mantienen una posición en línea recta, siempre que no se tenga que angular la muñeca o rotar el ante-

brazo. Se debe tratar que el sentido de trabajo coincida con el de la fuerza (Figura 7). Las vibraciones también pueden ser reducidas disminuyendo la fuerza de excitación o incrementando la masa efectiva, o bien mediante un sistema de amortiguamiento. Sin embargo, en una máquina manual la masa no puede ser radicalmente modificada sin afectar al manejo de la misma, aunque existen experiencias en este sentido.

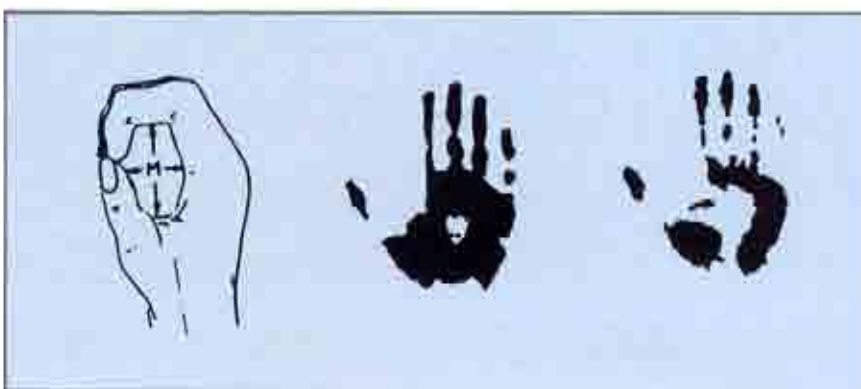
FIGURA 5

Agarre de abarcar	
	2 dedos
	3 dedos
	4 dedos
	mano

En ciertos casos, la fuerza de excitación puede cambiar totalmente a través de un rediseño completo de la herramienta (incluyendo un cambio en el principio de funcionamiento del equipo). También es importante un balanceo dinámico correcto de las partes en rotación. Además, es posible la utilización de sistemas de amortiguamiento, aunque en la práctica puede acarrear efectos adversos en la facilidad de uso de la máquina.

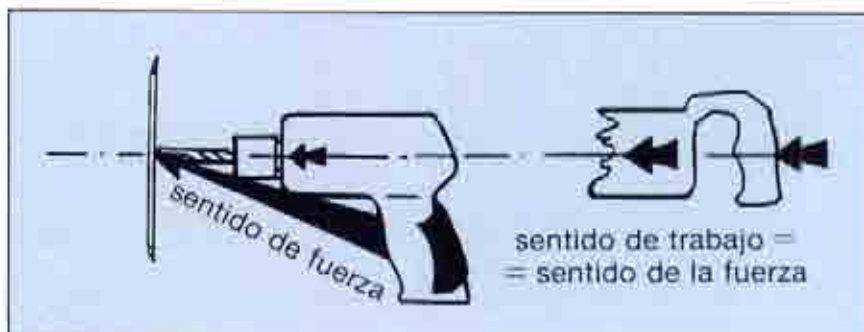
Las determinaciones de sensibilidad vibrotáctil no arrojaron resultados adversos, aunque debe destacarse que, para mayor precisión en su medida, deberían llevarse a cabo una serie de pruebas con cada persona; con el objeto de eliminar los errores de medición debidos al entrenamiento en el uso del equipo de medición. En el caso de exposiciones intensas, la medida periódica de la sensibilidad vibrotáctil puede resultar un buen mecanismo de prevención de CTD's.

FIGURA 6



Pulido de techo con herramienta eléctrica horizontal.

FIGURA 7



BIBLIOGRAFÍA

- Cumulative Trauma Disorders (CTD's)*. Vern Putz-Anderson. Taylor & Francis (1988).
- Occupational Exposure to Hand-Arm Vibration*. U.S. Department of Health and Human Service (1989).
- Human Vibration*. Brüel & Kjaer (1989).
- «Guidelines for the measurement and assessment of human exposure to hand-transmitted vibration», *ISO 5349. Mechanical Vibrations* (1986)

- «Hand-held portable power tools Measurement of vibration at the handle», *ISO 8662. Mechanical Vibrations* (1988)
- PÉREZ LACORZANA, J. M. *Valoración higiénica de las vibraciones*. XXI Asamblea de la C.S.I.S. (1989)
- Máquinas manejadas a mano*. Internationale Sektion «Machinenschutz» der IVSS (1990).
- Ergonomics tools in our time*. Atlas Copco (1988).
- Schwingungsarme Fahrersitze für Nutzfahrzeuge und Arbeitsmaschinen*. Heinrich Dupuis - VDI Verlag (1982).