

03-034

## ANALYSIS OF MORPHOLOGY AND PRESSURE DISTRIBUTION FOR MACHINE TOOLS COMFORT IMPROVEMENT

Artacho Ramírez, Miguel Ángel<sup>(1)</sup>; Arrufat Álvarez, José Manuel<sup>(1)</sup>; González Cruz, María Carmen<sup>(1)</sup>; Pacheco Blanco, Bélgica Victoria<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Universitat Politècnica de València

The shape of a product with which there is a high tactile interaction should fit ergonomic demands to ensure an adequate level of comfort during its use. The objective of this work is to know in which locations of the hand pressure peaks occur to conveniently modify the machine's morphology and reduce possible discomfort. To do this, a morphological analysis of two drilling machines was made through the Generalized Procrustes Analysis, and the pressure distribution and perceived comfort were obtained from usability tests performed by 30 subjects. As a result, there were statistically significant differences in the distribution of pressures between machines, as well as in their perceived comfort. Comparing this information with that obtained in the morphological analysis, it could be concluded that the perceived discomforts are directly related to the shape of the main and auxiliary handles, appearing in sections where the formal dissimilarity indexes between machines are higher. Thus, the analysis made allows determining the zones whose geometry significantly influences the comfort associated with the use of this type of machines, as well as to show the way in which they should be modified to improve it.

**Keywords:** *Morphology; Pressure Distribution; Comfort*

## ANÁLISIS MORFOLÓGICO Y DE DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PARA LA MEJORA DEL CONFORT EN EL USO DE MÁQUINAS HERRAMIENTA

La forma de un producto con el que existe una elevada interacción táctil debe respetar criterios ergonómicos para asegurar un nivel de confort adecuado durante su uso. El objetivo de este trabajo es conocer en qué partes de la mano se producen picos de presión para modificar convenientemente la morfología de las máquinas y reducir posibles molestias. Para ello se hace un análisis morfológico de dos máquinas de taladrar a través del análisis generalizado de Procrustes, se calcula la distribución de presiones y el confort percibido durante pruebas de uso realizadas por 30 sujetos. El resultado es que existen diferencias estadísticamente significativas en la distribución de presiones entre las máquinas, así como en su confort percibido por los sujetos. Comparando esta información con la obtenida en el análisis morfológico se deduce que las molestias percibidas están directamente relacionadas con la forma de los mangos principales y auxiliares, apareciendo en lugares donde los índices de disimilitud formal entre máquinas son mayores. Así, se puede concluir que el análisis realizado permite determinar las zonas cuya geometría influye de forma significativa en el confort asociado al uso de este tipo de máquinas, así como indicar el modo en que deberían modificarse para mejorarlo.

**Palabras clave:** *Morfología; Distribución de Presiones; Confort*



©2018 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

La correcta adaptación a la forma y dimensiones del cuerpo humano es un aspecto fundamental del diseño ergonómico de productos que influye en las prestaciones de seguridad, salud, confort y rendimiento.

Las metodologías clásicas de diseño que empiezan considerando los requerimientos del usuario y definiendo las funciones que el producto debe desempeñar para finalizar estableciendo los distintos subsistemas, componentes y partes tienen cada vez menor vigencia (Kaulio, 1998). El papel que juegan las percepciones y las sensaciones derivadas de la interacción con los productos es cada vez más relevante, requiriéndose una mucho menor granularidad a la hora de diseñar y modificar las formas de los productos para proporcionar el mayor confort posible.

Muchos autores han propuesto metodologías para evaluar el confort, elemento clave en las sensaciones que pueda experimentar un sujeto, en diversos contextos (Shackel, 1969; Corlett y Bishop, 1976; Borg, 1982; Lusted, 1994). Sin embargo, estos procedimientos tienen una fuerte componente subjetiva y son fuertemente dependientes de la cantidad de tiempo de uso y del estado del usuario. Otros autores se centran en la fenomenología física que tiene lugar en el espacio de interacción, procurándola relacionar con el confort percibido por el usuario. Kang et al. (2007) miden la presión de una prenda sobre un maniquí representativo de la fisionomía de la población a quien va destinada la prenda. Los trabajos de Shimojo et al. (1995) y Aldien et al. (2004) analizan la interacción entre un usuario real y un objeto físico, caracterizando de forma cuantitativa y objetiva los esfuerzos que tienen lugar al asir un mango patrón con la mano. Jordan y Bartlett (1995) estudian la distribución de presiones en la planta del pie y en la zona del tobillo para relacionarla con el confort percibido.

Por otro lado, la Fenética de Producto (Artacho-Ramírez, Arrufat-Álvarez y Alcántara-Alcover, 2016) es una nueva metodología válida a la hora de cuantificar diferencias morfológicas entre productos industriales y puede ser de utilidad para el diseño ergonómico de productos. Su elevada resolución y la capacidad de poder localizar espacialmente las diferencias formales computadas, ligada a un estudio de la fenomenología física existente en las zonas de interacción usuario-producto, puede aportar nuevas posibilidades de cara a poder determinar y modificar aspectos localizados de la morfología con una influencia clave en el confort. Otras propuestas que manejan gran cantidad de información morfológica, como las de Moon, Simpson y Kumara (2010), y Cheng y Chang (2016), evitan contemplar la configuración morfológica completa de los productos y se centran en establecer ontologías de atributos de producto y componentes organizados en jerarquías funcionales, o basan la descripción de la forma en modelos NURBS bidimensionales de baja resolución, respectivamente.

Este trabajo busca demostrar, en una primera aproximación, la utilidad del análisis morfológico para localizar atributos y zonas de las formas de productos industriales especialmente influyentes sobre el grado de malestar experimentado por un sujeto utilizando una máquina herramienta. Para ello se evalúan dos morfologías de producto y se registra la fuerza ejercida por los sujetos en puntos estratégicos de las carcasas en busca de una relación entre ambas que facilite la tarea del diseñador a la hora de optimizar el confort. Con esta información se pretende facilitar el diseño de la forma de las máquinas para mejorar la ergonomía y experiencia de uso de las mismas.

## 2. Material y Métodos

El estudio se realizó siguiendo las fases que se detallan a continuación:

- Pruebas de uso, destinadas a la obtención de información relativa a las fuerzas ejercidas por los sujetos sobre las máquinas y al registro del confort percibido por los mismos
- Análisis morfológico, destinado a computar y cuantificar la distribución de la disimilitud a lo largo de las geometrías de las máquinas
- Determinación de las secciones críticas a partir de la información recabada en las dos fases anteriores

### 2.1 Pruebas de uso

Las pruebas de uso consistían en la realización de cuatro orificios utilizando una única máquina taladradora equipada con una broca de diámetro de 8mm. El taladrado se realizaba sobre una plancha de 10mm de grosor de madera de aglomerado. El personal de apoyo y supervisión marcaba en cada ocasión el punto sobre el que el usuario debía realizar el agujero con su máquina. Por último, el usuario rellenaba un formulario para recabar información relativa al confort percibido. En total, 20 usuarios realizaron la prueba, diez con cada modelo de máquina. Para reducir la complejidad operativa del experimento se requería que los usuarios fueran hombres diestros.

#### 2.1.1 Selección de las máquinas

Se seleccionaron dos modelos pertenecientes a una misma familia de producto: taladros que se alimentan exclusivamente de la red eléctrica, con potencias comprendidas entre 500W y 650W, dotados de la función de percutor y de control electrónico de velocidad. Las máquinas utilizadas en la realización de las pruebas de uso se muestran en la figura 1.

Figura 1: Máquinas utilizadas en el trabajo



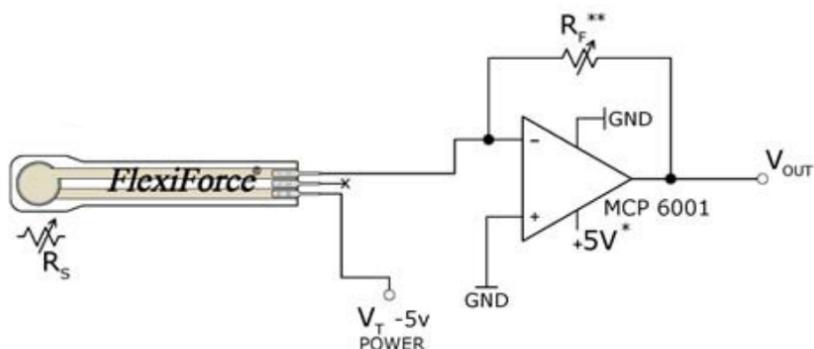
#### 2.1.2 Tipo de sensor y acondicionamiento de señal

Para poder medir la fuerza ejercida sobre la carcasa de las máquinas se planteó, atendiendo a criterios de economía, facilidad de ubicación y sencillez en el necesario acondicionamiento de señal, el uso de un sensor de fuerza de lámina flexible que basa su funcionamiento en la variación de conductancia de un material piezorresistivo. Para instrumentar cada máquina de

taladrar se utilizaron 12 sensores. Los sensores seleccionados para el registro de las fuerzas realizadas fueron los Tekscan A-201 FlexiForce que se muestran en la figura 2.

El acondicionamiento de señal para cada sensor se realizó con un circuito electrónico basado en un amplificador operacional en configuración de realimentación negativa, tomando como referencia una configuración base propuesta por el propio fabricante del sensor (ver figura 2).

**Figura 2: Sensor y circuito de acondicionamiento de señal**



### 2.1.3 Determinación de la ubicación de los sensores de fuerza

Con el fin de obtener la distribución de fuerzas que cada usuario ejerce sobre la máquina utilizada, la ubicación de los sensores ha de ser tal que permita registrar las fuerzas en aquellas partes de la superficie del taladro en contacto con las manos. Los tres requisitos siguientes fueron determinantes de cara a establecer los puntos donde ubicar los sensores:

- tener en cuenta los atributos antropométricos de la mano para la población objeto del estudio
- tomar como referencia las cualidades geométricas de la máquina para evitar que los sensores se ubiquen en lugares poco aptos para un registro fiable y/o significativo de la señal
- maximizar el aprovechamiento de los sensores considerando la variabilidad geométrica de las máquinas, atributos antropométricos de usuario y posibles patrones de agarre

En total, ocho sensores se dispusieron a lo largo del mango principal de las máquinas, colocando los cuatro restantes en el mango auxiliar. Cada sensor fue conectado a un circuito de acondicionamiento de señal independiente. En la figura 3 se muestra un detalle de la disposición de los sensores en ambas máquinas.

**Figura 3. Distribución de los sensores a lo largo de las carcasas**



#### **2.1.4 Registro de fuerzas y del confort percibido**

Durante los procesos de taladrado se registraron las fuerzas ejercidas por los usuarios sobre las carcasas de las máquinas mediante una tarjeta de adquisición de datos. El hecho de contar con doce sensores obligaba a adquirir doce señales analógicas de forma simultánea. Las señales de cada uno de los doce sensores fueron registradas en un ordenador personal que ejecutaba un software del propio fabricante de la tarjeta, una ME-Jekyll ME-4610 dotada de 16 entradas analógicas y conectada al ordenador mediante una interfaz PCI.

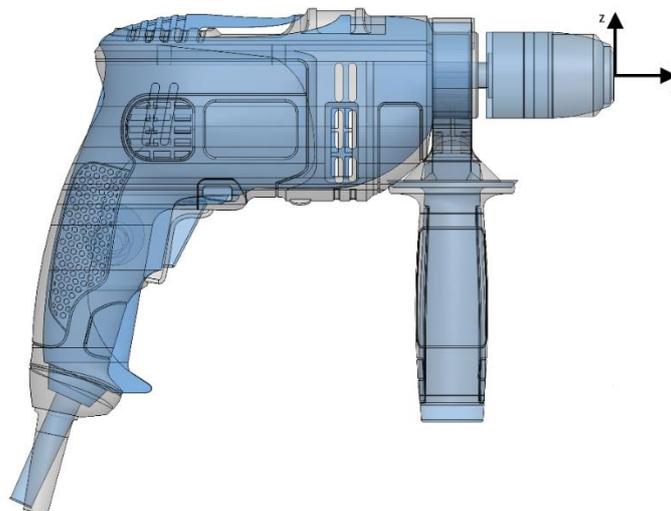
Tras la realización de los agujeros, el usuario cumplimentaba una breve ficha en la que proporcionaba datos generales de perfil de sujeto e indicaba si había experimentado algún tipo de molestia en las palmas de las manos digna de reseñar.

Para determinar si había relación entre las molestias percibidas en la mano con respecto a la máquina empleada se planteó una tabla de contingencia en la que se codificó de forma binaria si el sujeto había tenido problemas en cualquiera de las dos manos. A partir de los datos de la tabla se planteó una prueba Chi-cuadrado para  $p < 0.05$  estableciendo como variables categóricas la presencia o no de molestias y el modelo de máquina. Asimismo, se calculó el valor del estadístico V de Cramer para medir la intensidad de la relación entre variables en el caso de que la hubiera.

#### **2.2 Análisis morfológico**

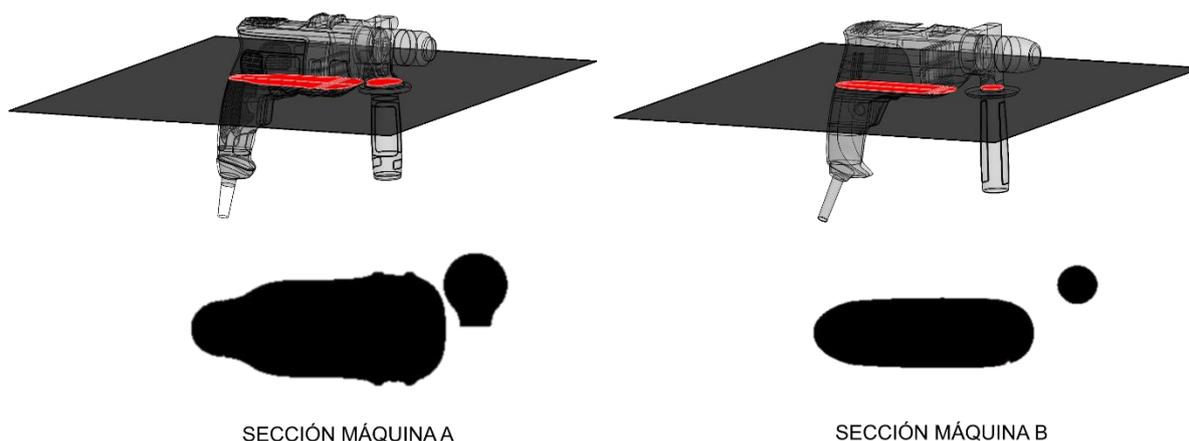
Para poder realizar el análisis morfológico, en primer lugar se tuvieron que digitalizar las carcasas de las máquinas mediante un brazo digitalizador mecánico Microscribe 3DX y un equipo informático dotado del software Rhinoceros 5.0. Las formas, una vez digitalizadas, fueron superpuestas y alineadas respecto a la misma referencia: el centro del protabrocas en su extremo exterior (ver figura 4).

**Figura 4: Máquinas superpuestas y alineadas**



El procedimiento utilizado para el análisis morfológico es el mismo que el propuesto en Artacho-Ramírez, Arrufat-Álvarez y Alcántara-Alcover (2016). Los modelos son segmentados a lo largo del eje z (ver figura 4) en incrementos de 3mm. Los valores positivos de la cota z hacen referencia a posiciones por encima del punto de enganche de la broca, mientras que las cotas que comprenden el espacio geométrico de los mangos tienen valor negativo. Se obtienen dos secciones en cada cota de dicho eje para cada máquina. Una correspondiente al mango principal, y otra correspondiente al mango secundario o auxiliar. Las secciones de los mangos principales se comparan entre sí, al igual que las de los mangos secundarios (ver figura 5).

**Figura 5: Obtención de las secciones a comparar**



Para computar el índice de disimilitud en todas las cotas en las que se realizan las secciones se utiliza una aplicación desarrollada en Matlab que está basada en el método de Procrustes (Ross, 2004). El resultado se almacena como una matriz de tres columnas, en la que la primera columna representa la cota a la que se ha realizado cada sección, mientras que la segunda y tercera columnas contienen los índices de disimilitud computados para los mangos principales y secundarios, respectivamente (Artacho Ramírez, Arrufat Álvarez y Alcántara

Alcover, 2016). Estos índices tienen un valor comprendido entre cero (similitud total) y la unidad (disimilitud total).

### 2.3 Análisis de diferencias en las fuerzas registradas por los sensores y en las molestias percibidas por los usuarios

Para confirmar si efectivamente se ejercen fuerzas distintas por parte de los usuarios a la hora de manejar los dos modelos de máquina, se realizó un análisis de varianza de un factor (ANOVA), en el que los valores medios de las fuerzas registradas por cada sensor eran las variables dependientes, y la máquina era la variable factor. El tratamiento estadístico se realizó con el software SPSS v. 16.

### 2.4 Determinación de las secciones críticas

A partir del análisis morfológico se pudo determinar qué cotas a lo largo del eje z de la geometría de las máquinas tenían una mayor disimilitud entre las dos máquinas atendiendo al valor del índice de disimilitud. Estas cotas se relacionaron con los sensores más próximos o superpuestos a las mismas para poder establecer una relación entre las fuerzas registradas en cada zona y la disimilitud morfológica existente.

## 3. Resultados

La tabla 1 indica la cantidad de usuarios que han sentido molestias en las palmas de sus manos durante la prueba de usabilidad.

**Tabla 1. Relación de molestias percibidas con la máquina empleada**

	Molestias percibidas	Sin molestias	Total
Máquina A	6	4	10
Máquina B	10	0	10
Total	16	4	20

La prueba Chi-cuadrado de Pearson realizada sobre los datos de la tabla A arroja una significación asintótica (bilateral) de 0,025 y el valor de la V de Cramer es de 0.54.

Los resultados del ANOVA se muestran en la tabla 2. Se indican además las fuerzas medias registradas por los distintos sensores.

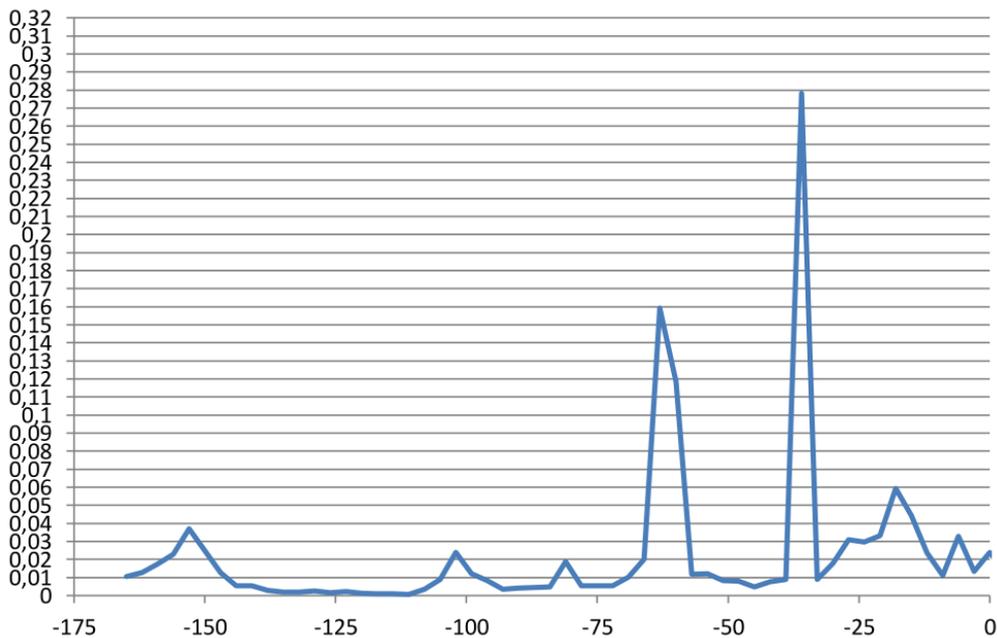
**Tabla 2. Análisis de varianza de los valores registrados por los sensores**

Variable dependiente	sig.	Fuerza media máquina A (N)	Fuerza media máquina B (N)
S1	0,000	342	246
S2	0,000	694	224
S3	0,000	1710	854
S4	0,000	219	261
S5	0,000	166	211
S6	0,000	147	169
S7	0,000	411	1170

S8	0,000	219	1320
S9	0,000	192	614
S10	0,000	438	187
S11	0,000	288	1035
S12	0,000	347	822

Los índices de disimilitud computados a lo largo de la morfología de los mangos principales de ambas máquinas se muestran en la figura 6.

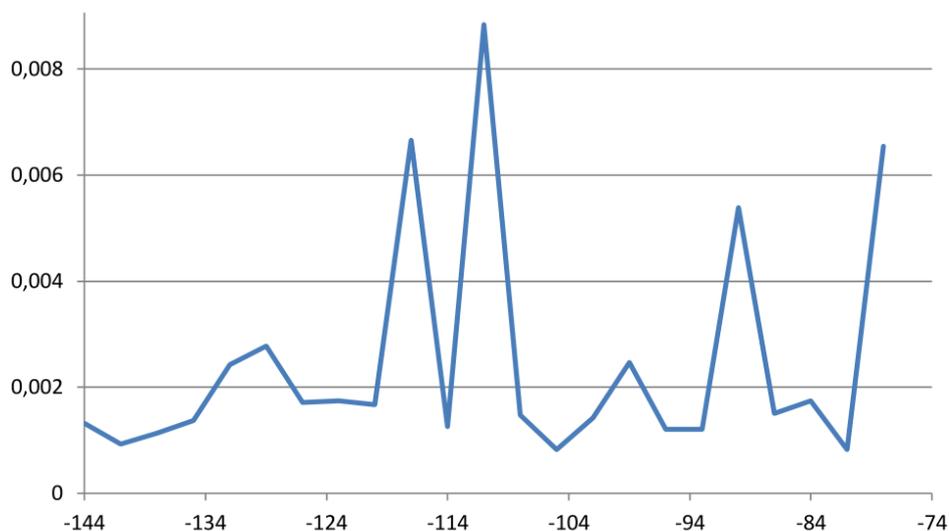
**Figura 6: Índices de disimilitud a lo largo del mango principal**



Nota: el eje de abscisas representa la cota en el eje z a la que se realiza el corte; el eje de ordenadas representa la disimilitud computada

Los índices de disimilitud computados a lo largo de la morfología de los mangos secundarios se muestran en la figura 7. Se representa por claridad en este caso el intervalo de cotas del mango secundario en que hay interacción táctil y están ubicados los sensores.

**Figura 7: Índices de disimilitud a lo largo del mango secundario**



Nota: el eje de abscisas representa la cota en el eje z a la que se realiza el corte; el eje de ordenadas representa la disimilitud computada

La tabla 3 muestra la ubicación de los sensores de la máquina A en relación a las cotas de los mangos y los índices de disimilitud computados para las mismas. Se destacan aquellos valores de disimilitud particularmente elevados (con índice de disimilitud mayor que 0,01).

**Tabla 3. Índices de disimilitud y correspondencia con la ubicación de los sensores de la máquina A**

Sensor	Cota (mm)	Índice de disimilitud	Sensor	Cota	Índice de disimilitud
S1	-81	0,018695144	S5/S6	-117	0,000776768
	-84	0,004756989		-120	0,001086651
	-87	0,00449407		-123	0,002224937
	-90	0,00398226		-126	0,001630828
S2	-123	0,002224937	S7/S8	-75	0,005460866
	-126	0,001630828		-78	0,005461729
	-129	0,002415816		-81	0,018695144
	-132	0,00181329		-84	0,004756989
S3	-63	0,159110254	S9/S12	-129	0,00277859
	-66	0,020029509		-132	0,00242942
	-69	0,010068575		-135	0,001370578
	-72	0,005522396		-138	0,001136104
S4	-111	0,00060102	S10/S11	-72	0,00125793
	-114	0,001072317		-75	0,004381

-117	0,000776768	-78	0,006544675
-120	0,001086651	-81	0,000819941

La tabla 4 muestra la ubicación de los sensores de la máquina B en relación a las cotas de los mangos y los índices de disimilitud computados para las mismas. Al igual que en la tabla anterior, se destacan aquellos valores de disimilitud particularmente elevados.

**Tabla 4. Índices de disimilitud y correspondencia con la ubicación de los sensores de la máquina B**

Sensor	Cota (mm)	Índice de disimilitud	Sensor	Cota	Índice de disimilitud
S1	-72	0,005522396	S5/S6	-117	0,000776768
	-75	0,005460866		-120	0,001086651
	-78	0,005461729		-123	0,002224937
	-81	0,018695144		-126	0,001630828
S2	-120	0,001086651	S7/S8	-81	0,018695144
	-123	0,002224937		-84	0,004756989
	-126	0,001630828		-87	0,004494065
	-129	0,002415816		-90	0,003982257
S3	-63	0,159110254	S9/S12	-135	0,001370578
	-66	0,020029509		-138	0,001136104
	-69	0,010068575		-141	0,000932537
	-72	0,005522396		-144	0,001323638
S4	-114	0,001072317	S10/S11	-78	0,006544675
	-117	0,000776768		-81	0,000819941
	-120	0,001086651		-84	0,001748069
	-123	0,002224937		-87	0,001510515

#### 4. Discusión

La metodología propuesta y los materiales y métodos empleados han permitido alcanzar los objetivos del estudio. A través del registro de fuerzas ejercidas en dos modelos distintos de máquina de taladrar y de las molestias al realizar la misma tarea por dos grupos independientes de sujetos, se ha podido identificar, mediante el análisis morfológico, las secciones implicadas en la aparición de dichas molestias.

En primer lugar, se ha podido constatar, a través de la prueba de Chi-cuadrado y la obtención de un valor de la  $V$  de Cramer mayor de 0.3, que las molestias dependen del modelo de máquina de forma significativa, lo que permite establecer a la máquina 5 como aquella que genera mayor número de molestias en los sujetos. Además, el hecho de que hayan aparecido diferencias significativas en el valor de las fuerzas medias registradas en todos y cada uno de los sensores pone de manifiesto que la geometría de los modelos condiciona el patrón de uso, generando distribuciones de presiones diferentes a lo largo de la geometría de las mismas y, consecuentemente, ocasionando un número de molestias distinto entre máquinas.

A partir del registro de fuerzas para cada sensor se puede conocer en qué sensores se ejerce de media una mayor fuerza, teniendo así localizada la geometría de las máquinas en las que esto ocurre. Además, gracias al método de análisis de diferencias morfológicas desarrollado por Artacho-Ramírez, Arrufat-Álvarez y Alcantara-Alcover (2016) basado en el método de análisis generalizado de Procrustes, se observa a lo largo del eje  $z$  la disimilitud formal entre los modelos. Solapando esa información se obtiene que precisamente las zonas en las que mayor fuerza se ejerce coinciden además con aquellas en las que mayores disimilitudes formales aparecen entre máquinas. Además, según Kuijt-vers (2007) en máquinas herramienta las presiones promedio más altas y las áreas de mayor contacto de presión están relacionadas con la incomodidad. De este modo, se puede conocer las secciones de la máquina 5 responsables de la generación de molestias, pudiendo así saber dónde actuar desde un punto de vista formal de cara a intentar mitigarlas. Además, como se sabe que la máquina 2 apenas genera molestias, su geometría en esas secciones puede servir de referencia para poder mejorar la geometría de la máquina 5.

Obviamente el estudio presenta limitaciones a las que habría que hacer frente en trabajos futuros. La primera es que la muestra de sujetos, aunque ha permitido obtener resultados significativos, debería incrementarse de cara a obtener mayor fiabilidad, como así ocurre con el número de modelos analizados. Otra limitación es el hecho de haber analizado sólo la disimilitud formal a lo largo de un eje. La inclusión de los valores de disimilitud a lo largo de los tres ejes y su conversión a un único indicador de disimilitud formal debería abordarse en trabajos futuros. Asimismo, en este trabajo se ha limitado el análisis morfológico a la geometría de los mangos principal y auxiliar, sin embargo, el resto de geometría y disposición espacial de los elementos que componen los taladros también son responsables del confort percibido finalmente en los mangos, pues condicionan los patrones de uso. Así, se debería relacionar toda la disimilitud formal con los registros de confort para obtener una relación global de toda la morfología de cada modelo con el confort percibido.

#### 5. Conclusiones

El análisis morfológico presentado en este trabajo y su relación con el confort supone una aportación prometedora de cara a mejorar los diseños en los que existe una alta interacción física entre usuario y producto. El enfoque presentado en este trabajo permite detectar secciones y geometrías dentro de una forma en las que aparece mucha disimilitud con respecto a otra forma que, en el caso de tratarse de un buen ejemplo en un parámetro como podría ser el confort, permite al diseñador obtener una referencia de cara a modificar convenientemente sus diseños en ese parámetro.

En el caso concreto de estudio, un modelo de máquina de taladrar genera de forma significativa más molestias que otro, sirviendo por tanto de referencia de cara a modificar el primero en aquellas secciones donde aparece mayor disimilitud entre ambos para reducirlas.

### Referencias

- Artacho Ramírez, M. Á., Arrufat Álvarez, J. M. & Alcántara Alcover, E. (2016). Product Phenetics as an Alternative to Establish a Relationship Between Morphology and Perception Associated to Industrial Products. En J. L. Ayuso Muñoz, J. L. Yagüe Blanco & S. F. Capuz-Rizo (eds.) *Project Management and Engineering Research, 2014*, (155-168). Springer.
- Borg, G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Med sci sports exerc*, 14(5), 377-381
- Chen, H.-Y., & Chang, H.-C. (2016). Consumers' perception-oriented product form design using multiple regression analysis and backpropagation neural network. *AI EDAM*, 30(1), 64-77.
- Corlett, E. & Bishop, R. P. (1976). A technique for measuring postural discomfort. *Ergonomics*, 9, 175-182
- Jordan, C., & Bartlett, R. (1995). Pressure distribution and perceived comfort in casual footwear. *Gait & Posture*, 3(4), 215-220
- Kang, T. J., Park, C. H., Jun, Y., & Jung, K. (2007). Development of a tool to evaluate the comfort of a baseball cap from objective pressure measurement:(I) holding power and pressure distribution. *Textile Research Journal*, 77(9), 653-660.
- Kaulio, M. A. (1998). Customer, consumer and user involvement in product development: A framework and a review of selected methods. *Total Quality Management* 9 (1), 141-149.
- Kuijt-Evers, L. F. M. (2007). Comfort in using hand tools: theory, design and evaluation. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands.
- Lusted, M., Healey, S., & Mandryk, J. A. (1994). Evaluation of the seating of Qantas flight deck crew. *Applied ergonomics*, 25(5), 275-282.
- Moon, S. K., Simpson, T. W., & Kumara, S. R. (2010). A methodology for knowledge discovery to support product family design. *Annals of Operations Research*, 174(1), 201-218.
- Ross, A. (2004). Procrustes analysis. *Course Report*. Department of Computer Science and Engineering. University of South Carolina.  
<https://cse.sc.edu/~songwang/CourseProj/proj2004/ross/ross.pdf>
- Shackel, B., Chidsey, K. D. & Shipley, P. (1969). The assessment of chair comfort. *Ergonomics*, 12(2), 269-306.
- Shimojo, M., Sato, S., Seki, Y., & Takahashi, A. (1995). A system for simultaneous measuring grasping posture and pressure distribution. Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 1.