

# Caracterización de la placa de una herramienta de bruñido con bola asistida por una vibración ultrasónica

G. Gómez Gras, H.A. González Rojas, J.A. Travieso Rodríguez, A.E. Nápoles Alberro, A.J. Sánchez Egea

Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universitat Politècnica de Catalunya  
e-mail-de-contacto: antonio.travieso@upc.edu

*En la industrial actual existen una gran cantidad de componentes mecánicos de máquinas-herramienta, automóviles, aviones, trenes, barcos, moldes, matrices de conformación, y muchas otras piezas; que deben tener una buena rugosidad superficial, una tolerancia geométrica concreta, un grado de dureza superficial elevado y unos valores de resistencia mecánica considerables para poder hacer frente a sus prestaciones. En los últimos años ha crecido notoriamente la cantidad de investigación asociada a los diferentes procesos que sean capaces de dejar en estas piezas, las características adecuadas para que puedan cumplir dichas prestaciones. A día de hoy se cuenta con un proceso capaz de solventar con éxito todas estas necesidades: el bruñido con bola, aunque éste también presenta sus limitaciones en cuanto a qué materiales se pueden bruñir, y cómo varía las propiedades de éstos. El presente trabajo aborda la caracterización de la placa vibrante de una herramienta de bruñido asistida por una vibración de alta frecuencia. Se espera que dicha vibración contribuya a hacer más fácil el desarrollo de este proceso de acabado, puesto que la misma debería ayudar a deformar con mayor facilidad el material de la pieza que se trabaja. Al final se obtienen las dimensiones óptimas para la placa de la herramienta, así como el modelo matemático que caracteriza su funcionamiento.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Un buen acabado superficial en una pieza con una geometría compleja, es un problema difícil de tratar. En la actualidad se someten a estudio muchas de estas necesidades, no solo porque son dificultades concretas con las que se tropieza la industrial actual, sino porque también se busca en paralelo, aportar soluciones novedosas para el alargamiento de la vida útil de muchos componentes que se someten diariamente, por ejemplo, a altas tasas de desgaste, o al efecto de fuerzas cíclicas. El proceso de bruñido con bola podría ayudar a solventar algunas de estas necesidades.

El bruñido con bola, se define como una operación tecnológica que consiste en deformar plásticamente las irregularidades de una superficie, por la acción de la fuerza ejercida por un cilindro o bola. (Travieso-Rodríguez, J. A., 2011) [1].

El presente estudio abordará la caracterización de una placa vibrante para una herramienta de bruñido asistida por una vibración de alta frecuencia, que se espera que contribuya a la mejora de este proceso de acabado. Esto surge de la necesidad que tiene la industria de añadir valor a las ventajas generales más explotadas, del bruñido con bola (Figura 1).

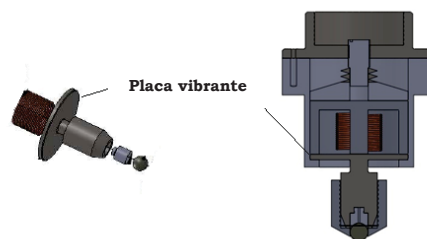


Figura 1. Placa sometida a estudio para su caracterización

## 2. DESARROLLO DEL ESTUDIO

### 2.1. Generador de vibración de alta frecuencia

Las vibraciones de alta frecuencia son de amplia aplicación en los procesos de fabricación mecánica. La razón fundamental de su uso, es la gran cantidad de fuerzas dinámicas que se generan, debido a la aceleración y desaceleración en frecuencias por encima de los 20kHz, que son beneficiosas para la superficie de trabajo.

En la industria actual los generadores de vibraciones de alta frecuencia más utilizados, suelen ser los transductores piezoeléctricos; sin embargo, en el caso de este estudio, las vibraciones de alta frecuencia se generarán a través de un transductor electromagnético que se utiliza para convertir la corriente alterna en un campo magnético variable (Figura 2). Dicho campo produce una fuerza de atracción cíclica sobre las placas metálicas de un espesor definido; deformándolas y haciéndolas vibrar a una frecuencia determinada por la frecuencia del campo magnético.

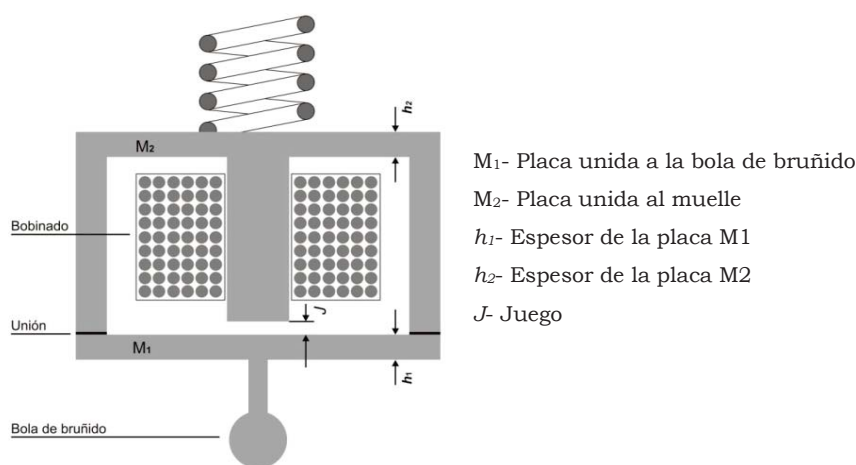


Figura 2. Esquema de funcionamiento del sistema de vibración de alta frecuencia.

A partir de estas premisas, desde el punto de vista de diseño, es importante controlar ciertos parámetros de los cuáles dependerá el correcto funcionamiento de la herramienta y que son aquellos especificados en el esquema de la Figura 2. Estos elementos de especial interés son:

- Los espesores de cada una de las placas  $M_1$  y  $M_2$ ,
- La inter-relación que se establece entre ellas,
- La distancia denominada juego  $J$ ; definida como la distancia que hay entre el núcleo de la bobina y el centro de la placa  $M_1$ . Esta distancia conceptualmente debe ser mayor que la deflexión máxima que sufra la placa  $M_1$  durante el funcionamiento de la herramienta.

Por tanto, en este trabajo se busca el valor máximo de la deflexión de la placa  $M_1$  a partir del cual poder estimar el valor óptimo del juego, sin que exista una disminución significativa de la fuerza del campo magnético, que es la que consigue transmitir la vibración a la placa  $M_1$  y a su vez a la bola de bruñido. Por otra parte el valor de esta deflexión dependerá también del espesor de ambas placas ( $M_1$  y  $M_2$ ). Cuanto mayor sea el espesor de estas, menor será el valor de la deflexión que sufran. Esta es la razón por la que durante todo el estudio se evalúan varios espesores para determinar cuál es el más adecuado.

Para la caracterización de esta herramienta se realizan los siguientes supuestos:

1. La amplitud y frecuencia de la vibración generada dependen directamente de la fuerza de atracción magnética que genera la bobina.

2. La deformación de las placas está en un régimen elástico, por lo tanto, las propiedades del material como el módulo de Young y la razón de Poisson, se consideran constantes.
3. La herramienta deberá trabajar en un régimen de resonancia, cuya frecuencia deberá ser estimada.

### 3. Modelado del sistema generador de vibración

#### 3.1. Criterio de clasificación de las placas

Una placa resiste las cargas transversales exclusivamente a través de la flexión. El comportamiento que puede tener una placa a flexión, depende principalmente de la relación entre su longitud característica ( $D$ ) y su espesor ( $h$ ). Las placas con una razón  $10 < D/h < 80$ , son llamadas placas delgadas y se caracterizan por no tener rigidez flexural. Dichas placas delgadas a su vez, se pueden dividir en dos subgrupos, en función de la razón, máxima deflexión de la placa  $w$  sobre el espesor  $h$ . [2]

Atendiendo a estas clasificaciones, la placa considerada en este estudio es una placa delgada rígida, debido a que: el diámetro de la placa  $D$  es del orden de 50mm, el espesor de la placa  $h$  es menor de 5mm y la deflexión máxima de placa  $w$  es menor que 0,08mm. Con estos valores la razón de aspecto  $D/h$  y la razón  $w/h$  se reducen a:

$$\frac{D}{h} > 10 \quad \text{y} \quad \frac{w}{h} < 0,2 \quad (1)$$

#### 3.2. Teoría de la curvatura de las placas delgadas rígidas

La teoría de la curvatura de placas rígidas, está basada en la clásica teoría de Kirchhoff [3]. En ella se desarrolla el problema de deformación de placas en función de los desplazamientos que experimenta la placa. Aplicando las ecuaciones de la elasticidad en tres dimensiones, se pueden derivar las ecuaciones que gobiernan la teoría clásica de deformación de placas.

El estudio de las deformaciones realizado por Kirchhoff permite asumir que: en placas delgadas sometidas a una flexión, no existe deformación en la dirección  $z$  ni deformación angular en los planos  $\theta z$  o  $rz$  (Figura 3). Por lo tanto, el problema de elasticidad se reduce a determinar los desplazamientos  $w$  en dirección  $z$  y las deformaciones en el plano  $r\theta$ .

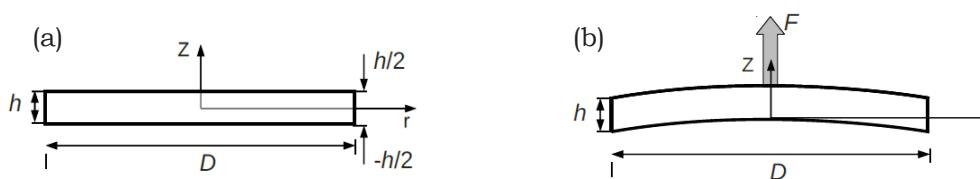


Figura 3. Placa circular (a) sin carga (b) con una carga transversal  $F$

El problema de elasticidad asociado a la placa en estudio, queda completamente definido si se determinan las componentes de la tensión, deformación y desplazamiento, en función de las coordenadas espaciales y temporales del cuerpo elástico. Las ecuaciones que permiten determinar las tensiones, deformaciones y desplazamientos, son: las ecuaciones de equilibrio, las relaciones deformación – desplazamiento y la relaciones tensión - deformación (ley de generalizada de Hooke), respectivamente.

Por lo tanto, asumiendo que las deformaciones en los sólidos a considerar son infinitesimales, la relación entre las componentes de la tensión y las componentes de la deformación, dependen del material que compone el sólido. En el caso de un sólido elástico e isótropo, las ecuaciones constitutivas toman la forma de la ley generalizada de Hooke [4].

La hipótesis de material isótropo, es adecuada para definir el comportamiento del acero C-45K (según norma EN-10083-2) con el que se fabricará la placa vibrante.

De la deducción de las ecuaciones de todas las teorías consideradas, se obtiene una ecuación diferencial que predice la deflexión  $w$  de la placa circular, en función del radio  $r$  y del tiempo  $t$ ; que es la base del modelo a desarrollar.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial r^4} + \frac{2}{r} \frac{\partial^3 w}{\partial r^3} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r^3} \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{P}{K} = \frac{\rho}{K} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (2)$$

Donde  $P$  es la distribución de cargas verticales, y el módulo de rigidez flexional de placas  $K$  se define como:

$$K = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (3)$$

Siendo  $E$  el módulo de Young y  $\nu$  la razón de Poisson. Las condiciones de borde son:

$$w(r = \frac{D}{2}) = 0 \quad \frac{\partial w}{\partial r}(r = \frac{D}{2}) = 0 \quad (4)$$

Por otro lado la distribución de cargas  $P$ , queda definida a través de la función:

$$P = P_0 \cdot ABS(\text{sen}2\pi f) \quad (5)$$

Donde  $P_0$  es el valor inicial que se supone para la carga, y  $f$  es la frecuencia de excitación de la bobina.

### 3.3. Modelo de placas acopladas

En el comportamiento global de las placas de la herramienta en estudio, además de la influencia del generador de vibraciones, se encuentran presentes otros elementos con igual relevancia. Cuando se comienza a aplicar una fuerza de bruñido en la herramienta, las placas  $M_1$  y  $M_2$  se deforman según la dirección de la fuerza, pero en sentido contrario la una de la otra. La deformación produce una deflexión resultante entre ambas placas, por lo que se debe estudiar la manera en que se acoplan las deformaciones de las mismas.

Para llegar a obtener estos resultados, se hace necesaria la realización de una serie de pasos sucesivos, que nos permitirán ir desglosando el análisis de los elementos hasta llegar a establecer el funcionamiento de todo el sistema.

#### 3.3.1. Solución al problema estático

Se soluciona el problema estático con el propósito de evaluar la deflexión resultante de las placas producto de una fuerza de bruñido constante. En este problema no se considera la fuerza debido a la vibración superpuesta. La deflexión estática de las placas es una condición que afecta al diseño de la herramienta. La fuerza de bruñido tiene que producir una deflexión resultante menor que el valor del juego  $J$ .

La solución propuesta se ha obtenido a través del método de diferencias finitas. La ecuación diferencial para el problema estático de una placa delgada rígida circular en el dominio  $0 \leq r \leq D/2$  se pueden reducir a la forma de la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial r^4} + \frac{2}{r} \frac{\partial^3 w}{\partial r^3} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r^3} \frac{\partial w}{\partial r} = \frac{P}{K} \quad (6)$$

Las condiciones de contorno se definen como:

$$w(r = \frac{D}{2}) = 0 \quad \frac{\partial w}{\partial r}(r = \frac{D}{2}) = 0 \quad (7)$$

En las Figuras 4-B, C y D se muestran los gráficos de la deflexión máxima de la placa  $M_1$  en un estudio comparativo para diferentes espesores  $h$  y valores de fuerza  $F$ . En estas gráficas se puede observar como la deflexión depende de ambos factores ( $F$ ,  $h$ ).

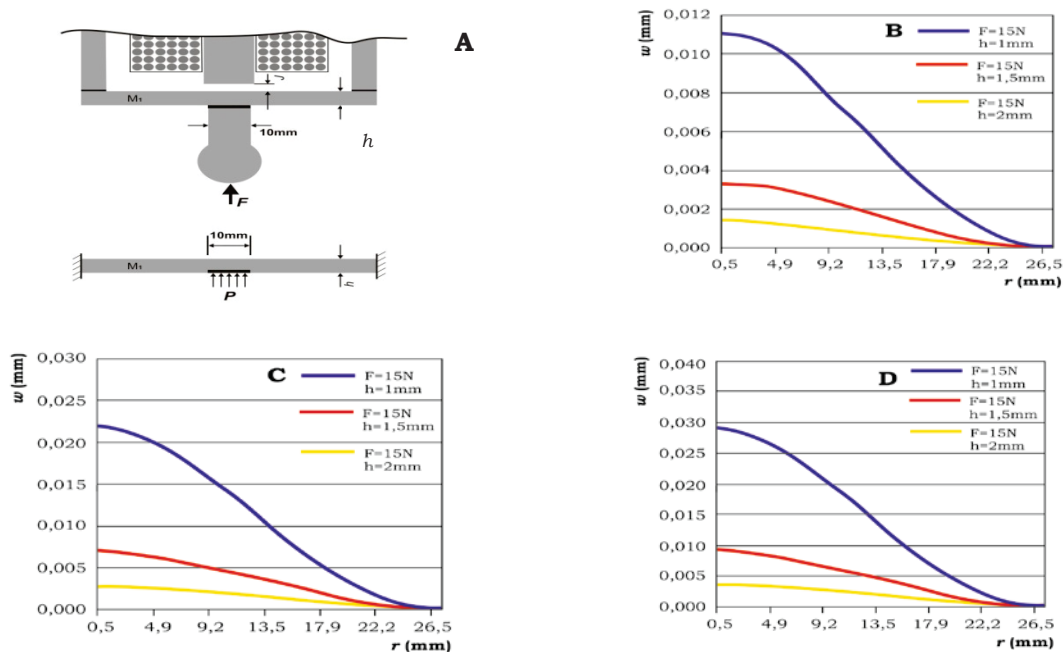


Figura 4. Representación de la deformación de la placa para diferentes condiciones de fuerza y espesor

La carga es aplicada tal como se muestra en la Figura 4-A. Se encuentra por ejemplo, que cuando la fuerza aumenta, la placa se deforma proporcionalmente a este incremento. Igualmente cuando los espesores son más pequeños las placas se deflecan más.

A manera de resumen, se podría decir que para estas condiciones, la mejor solución podría ser para el espesor de placa de 1mm, pues las deformaciones se encuentran dentro del intervalo previsto. Para los espesores de 1,5 y 2mm los valores de las deflexiones son muy pequeños y puede ser que no provoque ningún efecto sobre la rugosidad superficial de la pieza a bruñir.

### 3.3.2. Solución numérica al problema estacionario

El problema en estudio es en verdad dinámico, ya que intervienen fuerzas que van cambiando a medida que transcurre el proceso en el tiempo.

Para el análisis de las frecuencias se ha tenido en cuenta el método de Rayleigh [2]. Como primera aproximación al comportamiento de la herramienta se analiza el problema estacionario de la placa  $M_1$ .

$$f = \frac{20,66}{\pi D^2} \sqrt{\frac{K}{\rho h}} \quad (8)$$

Para este caso se puede llegar a estimar las frecuencias de resonancia (primer modo de vibración). Para ello se ha construido un software que resuelve la ecuación (8) para distintas frecuencias.

A partir de aquí, el estudio contempla el comportamiento de la frecuencia natural de vibración de la placa y de la frecuencia de excitación del sistema, definida como la frecuencia del generador sinusoidal. Cabe mencionar que la frecuencia de excitación

sinusoidal produce una fuerza de atracción, con una frecuencia equivalente al doble de dicha frecuencia de excitación.

Por esta razón, los resultados que se aprecian en las gráficas de la Figura 5 son en realidad equivalentes a la mitad de los que se obtienen calculados con (7) ya que se corresponden con la frecuencia de un semi-ciclo de vibración de la placa. El análisis se ha realizado para los tres espesores en estudio.

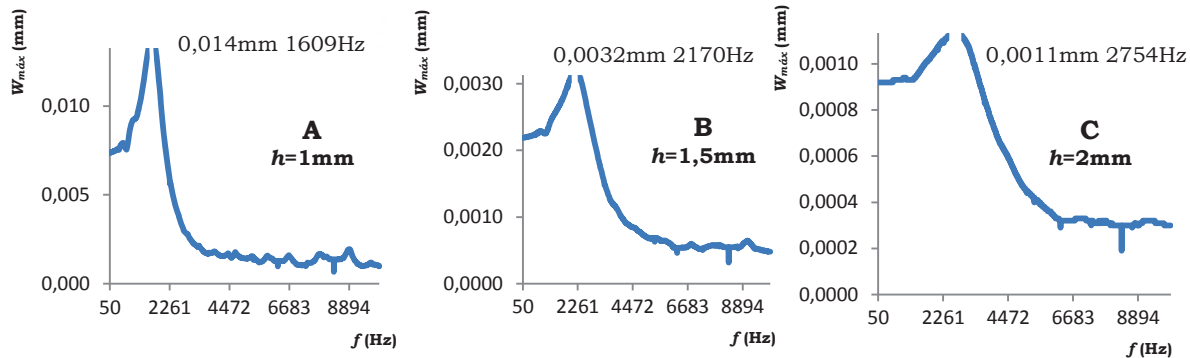


Figura 5. Barrido de la frecuencia de excitación sinusoidal de la placa  $M_1$ , para diferentes espesores.

A partir de este momento, los resultados son únicamente obtenidos a través de las soluciones numéricas. Para ello, se desarrolló un software específico, ya mencionado con anterioridad, que permite simular el comportamiento de las placas por separado y acopladas.

En el experimento que se describe a continuación, se han estudiado las placas con los espesores de 1mm y 2mm, que se han venido utilizando a lo largo de este trabajo. Para ello se han simulado tres situaciones diferentes:

- Una herramienta conformada por dos placas de 1mm
- Una herramienta conformada por dos placas de 2mm
- Una herramienta conformada por una placa de 2mm y otra de 1mm

En los gráficos de la Figura 6 se muestra un barrido de la frecuencia de excitación sinusoidal, para el problema de la vibración de las dos placas acopladas.

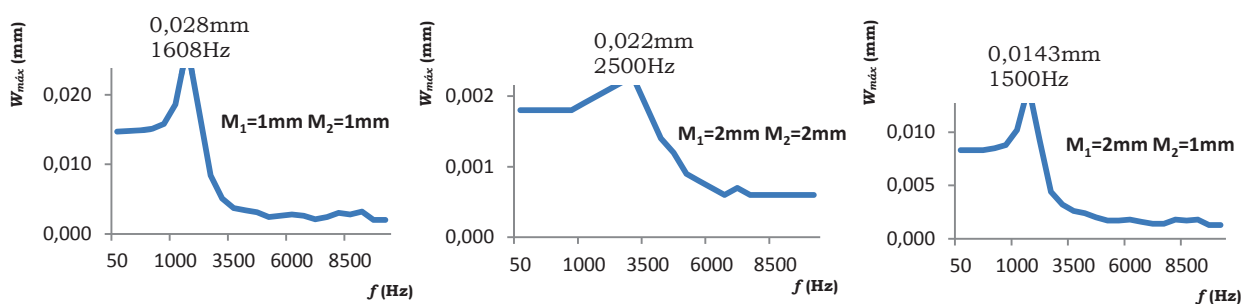


Figura 6. Barrido de frecuencias de la vibración de las dos placas acopladas para varios

Al analizar las gráficas de la Figura 6, se observa que el comportamiento de la deflexión relativa, es mayor en el caso en el que las dos placas tienen un espesor de 1mm, como era de esperar. Cuando las placas tienen espesor 2mm, casi no hay variación respecto al primer caso. Cuando hay una placa de 1mm y otra de 2mm, entonces la deflexión máxima relativa entre ellas disminuye. El comportamiento de las placas se ha analizado para un barrido de frecuencias entre 50Hz y 10000Hz.

#### **4. CONCLUSIONES**

De este trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Se ha desarrollado con éxito la caracterización de las placas implicadas en el diseño de una herramienta para ser utilizada en el proceso de bruñido con bola asistida por una vibración de alta frecuencia.
2. Se ha obtenido una solución numérica fidedigna para predecir los valores de deflexión que sufren las placas y a partir de ellos poder optimizar los diferentes parámetros básicos del diseño: el espesor de las placas, el juego y la frecuencia de trabajo del generador de vibraciones.
3. Se propone como configuración para la herramienta un espesor de ambas placas  $M_1$  y  $M_2$  de 1mm, un juego mayor de 0,04mm y la frecuencia de trabajo de la herramienta del orden de los 1608Hz (frecuencia de excitación sinusoidal que produce la resonancia de la placa).

#### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] Travieso-Rodríguez, J. A.; Desein, G.; González-Rojas, H. A., 2011. Improving the Surface Finish of Concave and Convex Surfaces Using a Ball Burnishing Process. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol.26, Iss.12, pp 1494-1502.
- [2] Kirchhoff, G.R.; 1850. *Über das gleichgewicht und die bewegung einer elastischen scheibe*, *J. Für die Reine und Angewandte Mathematik*, vol. 40, pp. 51-88.
- [3] P.C. Chou, N. J. Pagan, 1992. *Elasticity tensor dynamic and engineering approaches*, Dover Publication, Inc, New York.
- [4] Ventsel, E; Krauthammer, T.; 2001. *Thin Plates and Shells Theory, Analysis, and Applications*. Marcel Dekker, Inc. New York, USA.
- [5] Travieso-Rodríguez, J. A.; 2010. *Estudio para la mejora del acabado superficial de superficies complejas, aplicando un proceso de deformación plástica (Bruñido con Bola)*. Tesis doctoral, UPC.