

# Diseño y construcción de una máquina de manufactura rápida utilizando técnicas de conformado ultrasónico

## Investigación en curso

Javier Mario Quintero Plata  
Programa de Ingeniería Mecatrónica  
Jquintero20@unab.edu.co

Universidad Autónoma de Bucaramanga

### RESUMEN

El conformado ultrasónico es un método que permite realizar manufactura rápida, es decir, permite la creación de componentes finales listos para ser usados en la aplicación deseada. El elemento más crítico a la hora de aplicar técnicas de conformado ultrasónico es el sonotrodo, ya que este elemento es el encargado de unir las láminas de metal para ir dándole volumen al sólido mientras el sistema de fresado CNC remueve el material excedente. Para que la unión entre láminas sea fuerte el sonotrodo debe estar perfectamente sintonizado, es decir, que el transformador acústico debe tener una frecuencia de resonancia igual a la de las vibraciones generadas por el transductor para que se transfiera la mayor cantidad de energía al proceso, esto se logra seleccionando el material correcto y las dimensiones adecuadas del transformador acústico. Además que una correcta sintonía alargara la vida útil de la máquina.

### 1. INTRODUCCION

El ultrasonido es una onda mecánica inaudible que se caracteriza por estar a frecuencias superiores a 20kHz. La transmisión de estas ondas se produce al hacer vibrar el medio fuertemente y su velocidad de propagación depende directamente de este.

El conformado ultrasónico es una técnica para la construcción de sólidos a partir de la soldadura ultrasónica sucesiva de láminas de metal y fresados periódicos para remover el material excedente.

La soldadura ultrasónica se consigue aplicando una carga normal sobre los elementos a soldar para asegurar su contacto y produciendo desplazamiento relativo entre ellos, este se logra gracias a fuertes vibraciones ultrasónicas generadas por un sonotrodo, el cual está conformado por un transductor piezoeléctrico que se encarga de transformar una señal eléctrica alterna en vibraciones mecánicas, y un transformador acústico el cual amplifica las vibraciones y las aplica a los elementos.

El diseño y construcción del sonotrodo es crítico para el desarrollo del conformado ultrasónico, este requiere de especial atención ya que un sonotrodo mal construido puede reducir el rendimiento del proceso e incluso puede llegar a la destrucción del mismo inutilizando la máquina.

Teniendo en cuenta los principios del ultrasonido y la soldadura ultrasónica se plantea el diseño y construcción de una máquina de manufactura rápida utilizando técnicas de conformado ultrasónico.

Figura 1. Sonotrodo. [4]

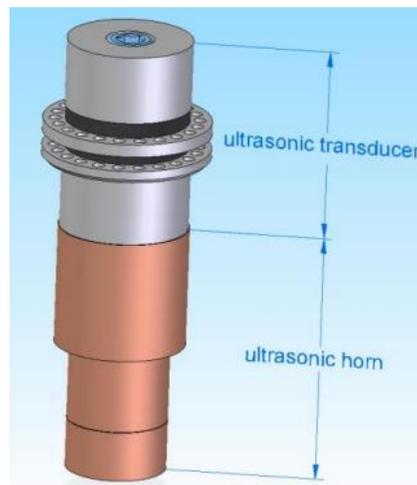


Figura 1. Sonotrodo. [4]

### 2. OBJETIVO

#### 2.1. Objetivo General

- Diseñar y construir una máquina de manufactura rápida utilizando técnicas de conformado ultrasónico.

#### 2.2. Objetivos Específicos

- Investigar acerca del estado del arte y la teoría referente al ultrasonido, máquinas de soldadura ultrasónica y sistemas CNC.
- Diseñar la estructura de la máquina.
- Diseñar el sistema de soldadura ultrasónica.
- Realizar el control del sistema CNC y de soldadura ultrasónica.
- Diseñar del sistema de alimentación y adecuación de la energía para alimentar el sistema.

### 3. PRINCIPIO DE OPERACION DEL CONFORMADO ULTRASONICO

Este proceso consiste en soldar láminas de metal una tras otra gracias a un sonotrodo rotatorio que realiza un movimiento oscilante junto con una fuerza normal sobre las láminas, y periódicamente ir retirando el material excedente a través del sistema de fresado CNC.

Se ha investigado mucho acerca de cómo se forma la unión entre las láminas, pero la teoría más aceptada es que esta se forma cuando las capas de óxido y las impurezas que hay en la superficie de las láminas se rompen debido a la fricción y los esfuerzos cortantes producidos por el movimiento relativo existente, aumentando cada vez más el área de contacto entre los metales y junto a esta coeficiente de fricción. Todo esto eleva la temperatura de las láminas y las lleva al límite elástico. Cuando alcanzan este punto el desplazamiento relativo entre las láminas cesa junto con la generación de calor debido a que la unión es inminente. Cabe resaltar que la unión es más fuerte en la dirección del movimiento oscilante.

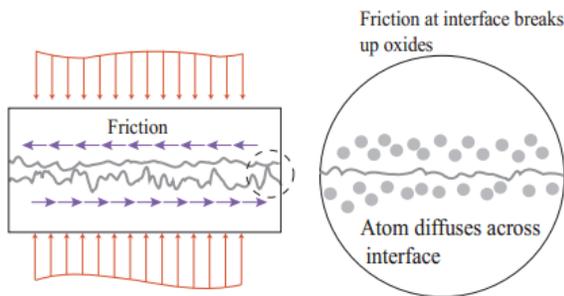


Figura 2. Destrucción de las capas de óxido de las láminas durante la unión. [1]

#### DISEÑO DEL SONOTRODO

Hay diversos tipos de transformadores acústicos entre los cuales existen cilíndricos, cónicos, exponenciales y escalonados (stepped), siendo este último el que se escogió para el diseño.

Un transformador acústico escalonado consiste en una pieza cilíndrica con dos secciones uniformes de diferente diámetro, donde el cambio de diámetro se conoce como nodo acústico.

La ganancia está directamente relacionada con los diámetros del transformador acústico y puede determinarse según la siguiente expresión:

$$G = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \left(\frac{D_1}{d_2}\right)^2$$

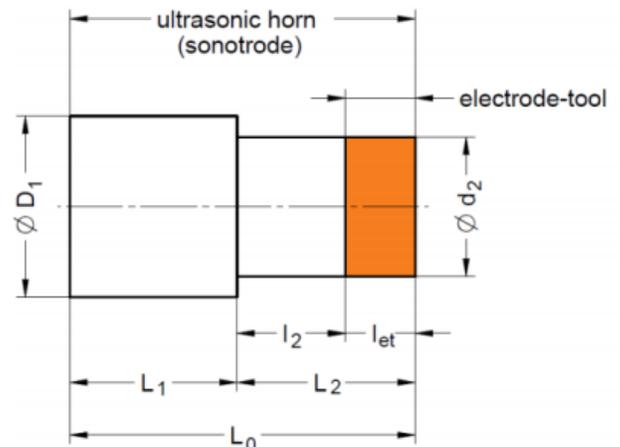


Figura .3 Principales dimensiones del transformador acústico escalonado. [4]

Donde la vibración se aplica en el diámetro mayor  $D_1$  y es amplificada saliendo con mayor amplitud por el diámetro menor  $d_2$ .

Las longitudes  $L_1$  y  $L_2$  deben calcularse cuidadosamente, ya que el nodo acústico debe coincidir con la reducción de diámetro para que la amplificación sea correcta. Estas dimensiones pueden hallarse fácilmente con las siguientes expresiones (hay que tener en cuenta que estas expresiones son aproximaciones).

$$L_1 = \frac{1.5}{k_u} \quad L_2 = \frac{1.6}{k_u}$$

Donde:

$$k_u = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \lambda = \frac{C_s}{f_{calc}}$$

$C_s$ : La velocidad de propagación del sonido en el material a utilizar.

$f_{calc}$ : Frecuencia de la vibración del transductor.

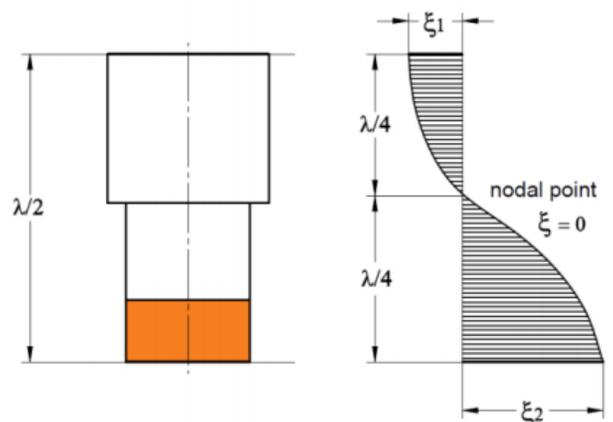


Figura 4. Transformador acústico escalonado – Relacion entre la ganancia de amplitud. [4]

Tomando como frecuencia de vibración del transductor ( $f_{calc}$ ) 20kHz, un diámetro de acople con el transductor ( $D_1$ ) de 52mm, y si requerimos una ganancia ( $G$ ) de 2 vamos a hallar teóricamente

los valores que definirán la geometría de nuestro transductor acústico teniendo en cuenta que el material utilizado será cobre, el cual posee los siguientes parámetros:

- Modulo de Young: 148 GPa
- Densidad: 8800 Kg/m<sup>3</sup>
- Coeficiente de Poisson: 0.33
- Velocidad de propagacion del sonido: 4010 m/s

Utilizando las ecuaciones anteriormente descritas obtenemos los siguientes valores que definen la geometria de el transformador acustico:

- L<sub>1</sub>: 0.04786 m
- L<sub>2</sub>: 0.05105 m
- d<sub>2</sub>: 37 mm

### ANALISIS DEL MODELO USANDO EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS

Ahora para comprobar que las dimensiones halladas corresponden a una geometria de cobre que tiene su frecuencia de resonancia a 20 kHz vamos a utilizar la herramienta COMSOL Multiphysics® “StructuralMechanics” – Eigenfrequency.

A continuacion se presenta en enmallado, el cual es generado automáticamente por el software y contiene 16941 elementos.

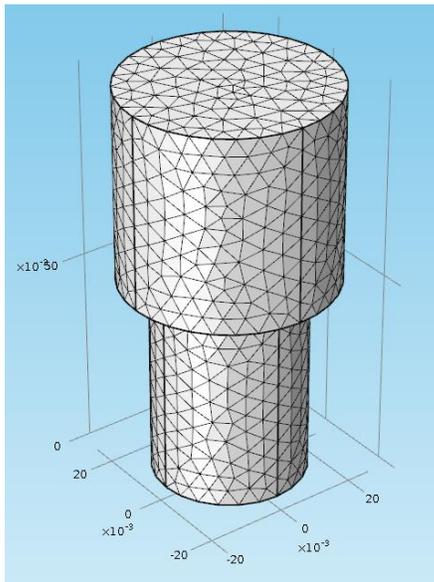


Figura 5. Enmallado 3D generado por el software con 16941 elementos

## 4. RESULTADOS

En la siguiente figura se muestra los resultados obtenidos en la simulacion de elementos finitos.

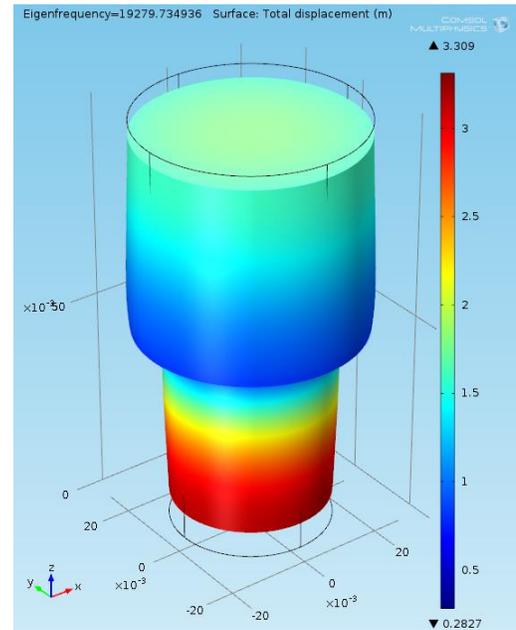


Figura 6. Frecuencia de resonancia del modelo 3D.

Como podemos ver en los resultados, el transformador acústico solo presenta deformaciones longitudinales lo cual indica que la frecuencia hallada es la frecuencia fundamental o primera frecuencia de resonancia, además, a medida que nos acercamos a el cambio de diametro observamos que el desplazamiento es cero lo cual indica que ahí se encuentra el nodo acustico.

Debido a que las expresiones utilizadas son aproximaciones, existe un error entre la frecuencia de resonancia teórica y la hallada por el analisis de elementos finitos. Como se puede ver en los resultados, la frecuencia de resonancia de nuestra pieza es de 19.27kHz (error relativo: 3.7% ) por lo que hay que realizar cambios iterativos en nuestra geometria hasta que su frecuencia de resonancia sea 20 kHz que es la frecuencia a la que sera exitado nuestro transformador acustico.

## 5. CRONOGRAMA

Actividad	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17
Revisión de la literatura	■	■	■	■	■												
Diseño y simulación de transductor y sonotrodo						■	■	■									
Modelo CAD estructural del prototipo de máquina de soldadura ultrasonica									■	■							
Pruebas experimentales con el transductor y sonotrodo											■	■					
Construcción del prototipo													■	■	■		
Pruebas experimentales con el prototipo																■	■

## 6. IDENTIFICACION DEL PROYECTO

Nombre del Semillero	Semillero de investigación en modelado y simulación
Tutor del Proyecto	Sebastián Roa Prada
Grupo de Investigación	Control y Mecatronica
Línea de Investigación	Modelado y Simulación
Fecha de Presentación	14 Marzo 2013

## 7. REFERENCIAS

- [1] James M. Gibert. (2009), Dynamics of Ultrasonic Consolidation, pp. 1-25.
- [2] Daniel McCullough. (2009), Dynamics Finite Elements Simulation of Ultrasonic Consolidation, pp. 1-10.
- [3] A. Dipal M. Patel, B. Avadhoot U. Rajurkar. (2011), Analysis of Diferent Shaped Sonotrodes used for Pastic Welding.
- [4] Eng. ALEXANDRU SERGIU NANU, Prof. Niculae Ion MARINESCU, Assoc. Prof. Daniel GHICULESCU. (2011), STUDY ON ULTRASONIC STEPPED HORN GEOMERTY DESING AND FEM SIMULATION.
- [5] M. Nad'a (2010), Ultrasonic horn desing for ultrasonic machining technologies.
- [6] Dale Ensminger and Leonard J. Bond (2012), Ultrasonics Data, Equations and Their Practical Uses 3ed.
- [7] Josué Aranda Ruiz (2010), Vibraciones de elementos simples con condiciones de contorno dependientes del tiempo.