

Diseño de un sonotrodo para aplicaciones de soldadura por ultrasonido Horn design for ultrasonic welding applications

F. J. Candelas-Romero ^a, E. Coutiño-Moreno ^{a*}, T. de la Mora-Ramírez ^a, L. A. Mier-Quiroga ^a,
D. Maldonado-Onofre ^a

^a Maestría en Ingeniería, Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Carretera Toluca-Atlaconulco, Km 44.8, Ejido de San Juan y San Agustín, Jocotitlán Estado de México.

Resumen

La soldadura por ultrasonido (USW) desempeña un papel crucial en la fabricación de componentes automotrices, destacándose por sus beneficios que incluyen eficiencia, bajo consumo de energía y la durabilidad de sus herramientas con mínimos requisitos de mantenimiento. Este proceso se distingue por la vibración ultrasónica de las superficies de contacto, aplicando simultáneamente presión externa para incrementar la fricción. El presente artículo presenta el diseño y verificación de un sonotrodo utilizado en un sistema ultrasónico para soldadura de dos componentes plásticos que además integra un sistema de localización por vacío, considerando la teoría del ultrasonido y de diseño de herramientas acústicas, así como de aplicaciones CAD-CAE integradas.

Palabras Clave: Soldadura por ultrasonido, sonotrodo, vibración axial, análisis modal, método de los elementos finitos.

Abstract

Ultrasonic welding is applied on automotive manufacturing process, this process has different advantages, is highly efficient process, it is low energy consumption, tools have a long-term lifetime and high period of maintenance time. The ultrasonic welding process is defined by the simultaneous vibration of contact surfaces, at define ultrasonic frequencies while applying external pressure, with the aim of increase friction. This research presents the design and verification of ultrasonic welding horn used for welding of two plastic components that also integrate a vacuum location system, considering the ultrasonic and acoustic tools design theory as well as CAD-CAE integrated applications.

Keywords: Ultrasonic welding, ultrasonic horn, axial vibration, modal analysis, fine elements method.

1. Introducción

La soldadura por ultrasonido ha adquirido una considerable importancia en diversos sectores industriales, como el automotriz, farmacéutico, textil y alimentario, ya que ha permitido la implementación de procesos altamente eficientes y de alta calidad (Sharang et al., 2019). Este método presenta varias ventajas en comparación con otros procesos, siendo limpio, confiable, consistente y económico. Además, destaca por su bajo consumo de energía, prolongada vida útil de los herramientas y la necesidad de un mantenimiento mínimo o nulo (Kumar et al., 2017). En el ámbito automotriz, el empleo de la soldadura por ultrasonido ha experimentado un aumento significativo en los últimos años. Este incremento se atribuye al desarrollo de nuevas tecnologías en materiales y a

la capacidad de este proceso para lograr una alta repetibilidad con tiempos de ciclo relativamente cortos, generalmente de 1 a 5 segundos (Kuman et al., 2018). Por otro lado, a diferencia de otros métodos de soldadura que dependen de diferentes fuentes de energía para transferir calor a los materiales, en la soldadura por ultrasonido, la máquina incorpora un sistema de ultrasonido que se utiliza para introducir vibraciones mecánicas en los componentes a unir, generando así el calor necesario para la soldadura (Sharang et al., 2019). Esta particularidad le otorga el título de un proceso de unión ecológico para metales y plásticos, ya que no demanda gases de protección como el helio o argón ni utiliza material fundente adicional, comúnmente requeridos en métodos tradicionales de soldadura (Kuman et al., 2018).

*Autor para la correspondencia: elvis.coutino@tesjo.edu.mx

Correo electrónico: 2021002@tesjo.edu.mx (Francisco Javier Candelas-Romero), elvis.coutino@tesjo.edu.mx (Elvis Coutiño-Moreno), tomas.delamora@tesjo.edu.mx (Tomas de la Mora-Ramírez), luis.mier@tesjo.edu.mx (Luis Antonio Mier-Quiroga), daniel.maldonado@tesjo.edu.mx (Daniel Maldonado-Onofre).

Un sistema convencional de soldadura por ultrasonido se compone de cuatro elementos principales: el generador, el convertidor, el amplificador y el sonotrodo. El generador es un componente electrónico que modifica las señales de corriente alterna de 110 a 440 voltios con una frecuencia de 50 a 60 Hz para generar una salida eléctrica de 800 a 1000 voltios, con una frecuencia de entre 15 a 35 kHz (Troughton, 2008). El convertidor, que recibe la energía eléctrica del generador a través de un cable coaxial, transforma esta energía en vibraciones mecánicas. El amplificador, situado entre el convertidor y el sonotrodo, es opcional y tiene la función de ajustar la amplitud de las vibraciones mecánicas, provenientes del convertidor según los requisitos específicos de la aplicación. Finalmente, el sonotrodo, también conocido como acoplador acústico, recibe las vibraciones mecánicas y las transfiere a los componentes que se van a soldar (Kenneth, 2006). Este último es uno de los componentes más críticos para los sistemas de ultrasonido, ya que entra en contacto directo o indirecto con el área donde se aplicará la energía, experimentando esfuerzos asociados a las tensiones a las que está sometido. Por esta razón, su diseño debe ser cuidadoso para cumplir adecuadamente con su función y servir como base para generar un proceso eficiente (Rani et al., 2013). El sonotrodo es único para cada proceso y su forma depende del proceso tecnológico y del diseño de los componentes a soldar. Los parámetros clave en su diseño incluyen longitud, dimensiones, material de construcción y frecuencia de trabajo (Sharang et al., 2019). Para aplicaciones de soldadura de plásticos las frecuencias más comúnmente utilizadas son de 20 y 35 KHz (Dipal et al., 2011a), (Troughton, 2008). Los sonotrodos deben resistir el desgaste originado por la fricción con las piezas a soldar, que varía según el tipo de material del que están contruidos (Rani et al., 2013). Algunas aleaciones de Aluminio y Titanio son comúnmente utilizadas para la fabricación de sonotrodos debido a sus excelentes propiedades acústicas (ZVEI-German Electrical Manufacturers Association, 1980).

El diseño de sonotrodos puede llevarse a cabo mediante métodos analíticos, que se basan en la aplicación de ecuaciones diferenciales, considerando el equilibrio de un elemento infinitesimal bajo fuerzas elásticas e inerciales. También pueden estudiarse mediante el método de elemento finito (FEM, por sus siglas en inglés), un método de análisis ampliamente aceptado que no solo optimiza recursos, sino que permite analizar los diferentes parámetros del diseño, antes de la manufactura del componente (Kumar et al., 2017), (Mubashir et al., 2022). En la mayoría de los casos, los sonotrodos se diseñan con una longitud de resonancia de media onda, lo que permite ajustar su factor de ganancia al modificar su sección transversal. Este factor representa la magnitud en la cual la herramienta aumenta la amplitud de las vibraciones mecánicas que recibe (Dipal et al., 2011b). Por otro lado, al diseñar la herramienta, es esencial considerar cómo se concentran los esfuerzos a lo largo de su estructura para prevenir un desgaste prematuro. Además, la magnitud del esfuerzo máximo en los sonotrodos está restringida a una región específica, garantizando que sea menor que la fuerza de rendimiento del material empleado en su construcción. Del mismo modo, el análisis de respuesta armónica de los diseños ayuda a prever la amplitud ultrasónica máxima en la zona de contacto del sonotrodo, asegurando su equivalencia al rango de

amplitud de soldadura del material (Kumar et al., 2017), (Djo et al., 2018).

El uso de herramientas tecnológicas, como el software de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) y de ingeniería asistida por computadora (CAE, por sus siglas en inglés), ha posibilitado la investigación y optimización del diseño de herramientas para diversas aplicaciones. En estas investigaciones, se han obtenido resultados positivos en el desempeño de la herramienta durante su aplicación experimental. (Pradeep et al., 2018), (Lucas et al., 1997), (Vivekananda et al., 2014). No obstante, en los casos revisados, no se encontraron estudios sobre sonotrodos que incorporen un sistema para la localización del componente a soldar. En la presente investigación, se analiza un sonotrodo utilizado en la soldadura de dos componentes A-B en una aplicación dentro de la industria automotriz. Este sonotrodo fue rediseñado para permitir la soldadura de una nueva combinación de componentes C-D, donde se requiere un control preciso de la posición en el ensamblaje. Por lo tanto, se busca realizar el diseño y análisis de una herramienta que integre un sistema de vacío para cumplir con este requisito. En la primera etapa, el diseño implica el modelado utilizando el software CAD. Posteriormente, se llevó a cabo el análisis de los parámetros y consideraciones principales mediante el método de elementos finitos (FEM) utilizando software CAE. Este análisis, es complementado con la evaluación de los requisitos de diseño y las características de las aplicaciones, permitió evaluar la viabilidad de utilizar una única herramienta para llevar a cabo el proceso de soldadura de ambas combinaciones de componentes aprovechando la similitud en sus dimensiones. El resultado fue la reducción de tiempos de paro al cambio de modelo en la estación de soldadura, generando así una operación más eficiente.

2. Tipos de sonotrodos

Los sonotrodos son generalmente barras cilíndricas sólidas o blocks rectangulares con longitud y forma regular o variable. Su longitud depende de la frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación de las vibraciones en el material, de igual forma la amplitud máxima de las vibraciones ultrasónicas, se relaciona principalmente con las propiedades del material y de su forma. En la práctica, se fabrican con aleaciones de aluminio, titanio y acero. El diseño y análisis de estos dispositivos basados en los fundamentos del proceso de soldadura por ultrasonido, incluye la selección del material, la determinación de la frecuencia de trabajo y el cálculo de las dimensiones básicas (Venkata et al., 2021). Las formas de sonotrodos más comunes son stepped, cilíndricos, exponencial, cónicos, Blazer y Gaussianos. El diseño stepped está formado por dos secciones diferentes, cada una de ellas con una sección transversal uniforme. Estos generan factores altos de amplificación debido al cambio abrupto que presenta su sección transversal en el plano nodal, el esfuerzo máximo se presenta cerca de la zona de transición de las 2 secciones. Los cónicos tienen una sección transversal que cambia en forma cónica a través de su longitud, esta transición gradual le permite una distribución de esfuerzos a lo largo de su longitud, sin embargo, presentan generalmente bajos factores de ganancia, por lo que son utilizados en aplicaciones que requieren bajos requerimientos de amplitud (Kuman et al., 2018). En las Figuras 1 y 2 se muestran algunos ejemplos de

geometrías comúnmente utilizadas para el diseño de estos componentes.

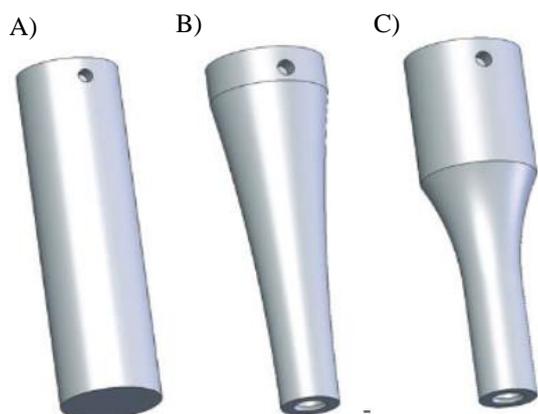


Figura 1: Tipos de sonotrodos. A) Cilíndrico, B) Exponencial, C) Stepped (Horn catalog Branson, 2023).



Figura 2: Diferentes tipos de sonotrodos (Flores & Ruiz, 2014).

3. Consideraciones generales del diseño

El sonotrodo es una herramienta acústica diseñada para transmitir vibraciones mecánicas a la pieza de trabajo, este debe cumplir con requisitos específicos de amplificación. Durante su funcionamiento, las moléculas del sonotrodo experimentan expansión y contracción a la frecuencia de vibración, y su amplitud máxima se define por el movimiento desde el valor más bajo hasta el valor más alto en la superficie en contacto con la pieza (Dipal et al., 2011b), (Kumar et al., 2017). Por lo tanto, se debe diseñar para operar en un modo de frecuencia axial también conocida como longitudinal y estar relativamente aislado de otros modos de vibración para concentrar toda la energía de ultrasonido en la zona de soldadura (Suresh et al., 2017). En el proceso de diseño, se deben considerar factores como la frecuencia de operación del equipo y el material de fabricación, que determinarán dimensiones clave, como la longitud promedio. Asimismo, la distribución de tensiones a lo largo del resonador debe ser cuidadosamente orientada para garantizar una vida útil razonable. Para la mayoría de las aplicaciones un incremento de la amplitud es deseable (Derks, 1984). La selección de materiales para su construcción se realiza en función de sus bajas propiedades de amortiguamiento, y la amplitud máxima alcanzable depende en gran medida de estas características y de la forma de su sección transversal (Kuen et al., 2015). Las

aleaciones de titanio y aluminio son las opciones más comunes para el diseño de sonotrodos, siendo las aleaciones de titanio preferidas debido a sus propiedades acústicas excepcionales y a su alta resistencia a la fatiga, lo que permite una larga vida útil del componente a altos niveles de amplitud (Subhankar et al., 2016). Dado que el sonotrodo experimenta cargas dinámicas, se realizan dos tipos de análisis dinámicos durante la etapa de diseño: análisis modal y análisis armónico. El análisis modal se enfoca en estudiar las propiedades dinámicas bajo vibración, incluyendo las frecuencias naturales y modos de vibración (Kumar et al., 2018). Los modos de vibración son una característica inherente e integral de una estructura elástica. Mediante el análisis modal, es posible reconocer las particularidades de los modos principales en los que la estructura se desenvuelve dentro de un rango de frecuencias. Asimismo, se puede predecir la respuesta ante la vibración, tanto en condiciones de carga interna como externa. De este modo, el análisis modal se erige como un método fundamental en el diseño dinámico de una estructura (Xiao et al., 2018). Para llevar a cabo el análisis dinámico del sonotrodo, se utiliza el método de elementos finitos (FEM), una técnica ampliamente adoptada para modelar, analizar y predecir el rendimiento de sistemas reales. La precisión del modelo en FEM no depende tanto de una técnica de análisis específica, sino de que las consideraciones en el modelo reflejen fielmente el sistema físico (Kuen et al., 2015). De acuerdo con (Praveen et al., 2018) los sonotrodos que resultan difíciles de analizar mediante métodos convencionales pueden diseñarse fácilmente utilizando FEM, ya que este análisis toma en cuenta la forma, el volumen, el material y las condiciones de frontera en el rango de frecuencias de trabajo. Asimismo (Kumar et al., 2017) confirma que el análisis FEM puede ser eficaz para determinar los esfuerzos que experimenta el sonotrodo a lo largo de su estructura y prevenir fallas indeseadas durante su operación.

La optimización del diseño del componente debe llevarse a cabo minuciosamente a través FEM durante la fase de análisis, con el objetivo de lograr un modo de vibración axial. Este modo de vibración debe ocurrir dentro del rango de frecuencia de operación de la máquina. La relación entre la longitud del sonotrodo y el modo de vibración axial se determina mediante la resolución de (1):

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 2l \quad (1)$$

donde λ , f , E , ρ y l representan la longitud de onda, la frecuencia en modo axial, el módulo de elasticidad, la densidad y la longitud del sonotrodo respectivamente (Hahn et al., 2021), (Pradeep et al., 2018).

La ganancia o índice de amplificación β del sonotrodo puede ser determinado mediante (2):

$$\beta = \frac{A_1}{A_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad (2)$$

donde D_1 es el diámetro de entrada y D_2 es el diámetro de salida de un sonotrodo con sección circular (ZVEI-German Electrical Manufacturers Association, 1980).

De igual forma, la longitud l_1 y l_2 de las secciones transversales de un sonotrodo stepped pueden estimarse mediante (3-5) (Grabosa et al., 2015):

$$l_1 = \frac{1.5}{k_u} \quad (3)$$

$$l_2 = \frac{1.6}{k_u} \quad (4)$$

donde:

$$K_U = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (5)$$

Una vez que se obtiene un modo de vibración apropiado mediante este análisis, se debe realizar un análisis armónico, el cual permitirá predecir la amplitud máxima de la herramienta y el esfuerzo máximo de Von-Mises. De acuerdo con (Subhankar et al., 2016) el esfuerzo generado en el sonotrodo no debe superar el límite de resistencia a la fatiga del material, que se ve afectado por factores como la superficie del material, la concentración de esfuerzos y la temperatura, entre otros. Estos factores pueden influir en la durabilidad del material, por lo que es esencial considerar un factor de seguridad apropiado. En otra perspectiva, (Suresh et al., 2017) indica que, si hay una separación significativa entre los modos de vibración determinados, los efectos entre estos modos y la frecuencia de resonancia pueden considerarse insignificantes, lo que resulta en una mínima influencia del efecto de amortiguamiento. Además (Hammed et al., 2021) señala en su análisis de diversas formas de sonotrodos que el efecto del amortiguamiento es bajo en la frecuencia de resonancia, la amplitud de vibración y los esfuerzos generados a una frecuencia de operación de 20 KHz, por lo que puede considerarse despreciable. La distribución de esfuerzos en la herramienta puede calcularse por el criterio de Von-Mises descrito por (6) en donde σ_1 , σ_2 , σ_3 son los esfuerzos principales y σ_0 es el esfuerzo de cedencia:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_0^2 \quad (6)$$

Asumiendo que la distribución de esfuerzos en el plano de sección transversal, donde no hay movimientos transversales, implica que solo hay un esfuerzo principal que actúa en una dirección $\sigma_2 = \sigma_0$, el esfuerzo de Von-Mises será igual al esfuerzo principal máximo en dirección longitudinal. Los esfuerzos máximos siempre deben ser tomados en cuenta en cualquier diseño, siendo ideal que el esfuerzo máximo se ubique en la región elástica del material. El esfuerzo máximo permisible en un componente ultrasónico se puede calcular dividiendo el esfuerzo de cedencia entre el factor de seguridad. (Kanwal et al., 2014).

El uso de sistemas de vacío integrados a herramientas de soldadura por ultrasonido es ampliamente utilizado por fabricantes de equipos de soldadura por ultrasonido como Branson o Dukane, estos son descritos en algunos de sus catálogos, los sonotrodos con sistema de vacío se utilizan para sujetar piezas que son difíciles de colocar antes de soldar o insertar. Para ello una cavidad en la cara del sonotrodo se adapta a la forma de la pieza. Un pequeño orificio, perforado desde el centro de la cavidad hasta la región nodal del sonotrodo, está conectado a un orificio perpendicular que sale del mismo hacia un sistema de vacío. La pieza se coloca en la punta con la mano y el vacío la mantiene en su lugar hasta que se suelda. Los sonotrodos con sistema de vacío eliminan los

errores de posicionamiento, lo que a su vez acelera la producción. (Horn catalog Branson, 2023)

4. Metodología

De acuerdo con las consideraciones de diseño y a la revisión bibliográfica, se desarrolló la metodología propuesta para el diseño de la herramienta. En primera instancia, se deben de tomar en cuenta las características geométricas de los componentes sobre los que se desea aplicar al proceso de soldadura por ultrasonido. Además, es necesario revisar las características de los materiales y de las capacidades de la máquina con que se realizará el proceso de soldado de los componentes, ya que estos datos son la base del análisis a realizar en el sonotrodo. Específicamente, en la superficie de salida, se deben considerar las dimensiones y condiciones geométricas del producto a soldar, ya que la herramienta debe adaptarse a este componente, esto para poder ejecutar la transferencia de energía a través de esta pieza hacia la zona de soldadura. Por otro lado, la superficie de entrada debe ser diseñada de manera que el resonador pueda acoplarse a la parte generadora de vibraciones de la máquina de soldadura. Una vez definidos los requerimientos del diseño, el siguiente paso es realizar la identificación de sus dimensiones básicas (longitud, radios) con base al tipo de sonotrodo que desea diseñar. Posteriormente, se realiza el modelado en el software CAD, con el cual se ejecuta el análisis del diseño en el software CAE. Con base a los resultados se define la optimización, asegurando que el diseño propuesto es adecuado para trabajar en resonancia con el conjunto generador. Esto permitirá a la herramienta realizar una operación eficiente y garantizará una esperanza de vida razonable. Además, de realizar los ajustes necesarios para asegurar la correcta operación del componente previo a su fabricación. Como parte de la última etapa del proyecto, se confirma la amplitud del sonotrodo mediante la medición experimental de los valores de amplitud entregados por este. Esto contribuye a confirmar el correcto desempeño de la herramienta en la aplicación.

5. Diseño de la nueva herramienta

Como parte de la primera etapa de la metodología, se analizan los componentes que forman el ensamble y los materiales de los que están fabricados, con el objetivo de conocer sus propiedades y dimensiones para obtener la información que es la base para el diseño del sonotrodo. Los ensambles de los componentes, presentados en la Figura 3, están conformados por una tapa (A) que cuenta con un barreno en el cual se inserta un tapón (B). Este tapón se debe soldar empleado el proceso de soldadura por ultrasonido para sellar el barreno. Estos componentes son empleados en la aplicación actual. Asimismo, se presenta la combinación de componentes para el nuevo ensamble, que incluye una tapa (C) y tapón (D). En este caso a diferencia del ensamble actual, el tapón (D) presenta una geometría que le requiere ser ensamblado con orientación específica, ya que la funcionalidad del producto depende de ello. Por lo cual es una consideración que debe tenerse en cuenta durante la planificación del proceso de ensamble y el diseño de la herramienta. Ambos componentes están fabricados con resinas de polioximetileno con puntos de fusión

de entre 160 a 170 °C, estos valores se obtienen de las fichas técnicas de los materiales, ver Tabla 1.

Tabla 1: Datos técnicos de los materiales del ensamble

Componente	Material	Punto de fusión en °C.
Componente A, C (tapa)	POM (Hostaform)	164 – 172 °C.
Componentes B, D (tapón)	POM (Celcon)	160 – 170 °C.

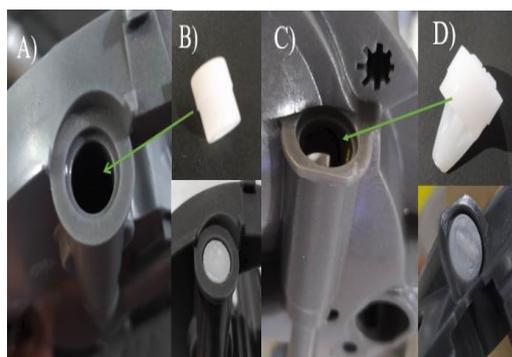


Figura 3: Componentes del ensamble. A) Tapa aplicación actual, B) Tapón aplicación actual, C) Tapa nueva aplicación D) Tapón nueva aplicación.

De igual forma en la Figura 4 se presenta el diseño de la herramienta utilizada para soldar los componentes de la aplicación actual y que desea ser reemplazado por la nueva herramienta.

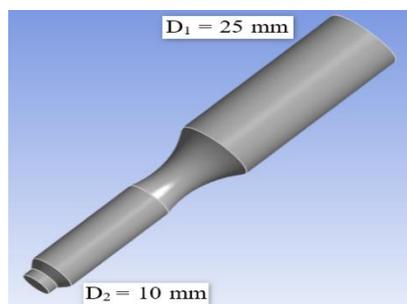


Figura 4: Diseño de sonotrodo actual.

En cuanto a las dimensiones básicas a considerar, el diámetro del componente a soldar (tapón D) es de 11.40 ± 0.05 , por lo que el sonotrodo deberá cubrir la mayor cantidad de área del componente, considerando una tolerancia para evitar que este colapse con la tapa durante el proceso de ensamble. El diámetro de salida de la nueva herramienta se consideró de 11.15 mm, a diferencia de la herramienta actual, la cual tiene un diámetro de 10 mm. En la zona de fijación con el conjunto oscilante la herramienta actual tiene un diámetro de 25 mm y este se mantendrá igual en la nueva herramienta. El material seleccionado para la fabricación fue el Titanio Ti6Al4V, una aleación que consiste en un 6% de Aluminio, 4% Vanadio, 0.25% máx. de Acero, 0.2% Oxígeno máx. y resto de Titanio. Esto con base a los requerimientos de trabajo de la aplicación, y en que de igual manera este es el material del que está construida la herramienta actual, la cual ha presentado un buen índice de fiabilidad en la operación. Como parámetros de entrada para el análisis FEM, es necesario conocer las

propiedades mecánicas del Ti6Al4V, las cuales se encuentran descritas en la Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades de la aleación Ti6Al4V (Titanium Processing Center, 2023)

Ti6Al4V		Valor
Módulo de Young	E	118 GPa
Densidad	ρ	4500 kg/m ³
Relación de Poisson	ν	0.33
Limite elástico		786 – 910 MPa
Limite de resistencia a la fatiga a 1×10^7 ciclos		510 MPa

Adicional, el equipo con el que se cuenta para desarrollar la operación de soldadura por ultrasonido de estos componentes es un generador Hermann Ultrasonic modelo VE Slim Vario. Este generador cuenta con las características descritas en la Tabla 3, las cuales son tomados directamente de los datos de placa del equipo.

Tabla 3: Características de la máquina de soldadura por ultrasonido Generador Hermann US modelo VE Slim Vario

Parámetro	Valor nominal
Frecuencia (f)	20 ± 1 KHz
Amplitud a la salida del Convertidor	12 μ m
Ganancia del amplificador	1:1.8
Amplitud de salida del amplificador	21 μ m
Diseño de herramienta actual	Stepped

Estos parámetros, al igual que los datos del material, son base de entrada para el análisis del diseño del sonotrodo. Al mismo tiempo, que describen las capacidades del equipo, son parámetros que definen las condiciones de frontera a utilizar en el análisis FEM mediante el software CAE. Por último, al conocer el valor máximo de amplitud a la salida del amplificador, también se permite estimar los requerimientos de ganancia que el sonotrodo deberá cumplir para poder alcanzar el valor de amplitud necesario para que el material pueda alcanzar su punto de fusión y dar paso a la soldadura de los componentes. De acuerdo con (ZVEI-German Electrical Manufacturers Association, 1980), los rangos de amplitud recomendados para soldar componentes conformados con resinas de POM mediante el proceso de soldadura por ultrasonido se encuentran entre 40 a 50 μ m, como se describe en la Tabla 4. Esto valores también se consideran como una base para definir el rango de amplitud a la que se espera que el sonotrodo pueda trabajar.

Tabla 4: Valores de amplitud recomendados en soldadura por ultrasonido (ZVEI-German Electrical Manufacturers Association, 1980)

Material	Amplitud (μ m) Valores adoptados en la práctica
Polystyrol (PS)	15 a 30
Polystyrol impac strong (SB)	20 a 35
Acryl, butadiene-styrol (ABS)	20 a 30
Stryol-acryli nitrile (SAN)	15 a 30
Polymethyl metacrylate (PMMA) inyection mould	20 a 35
Modified PPO	25 a 40
Policarbonate (PC)	25 a 40
Poliacethyl resin (POM)	40 a 50

Polyamide (PA)	35 a 55
Polyesthyl enterephtalate (PETP)	45 a 55
Polubuthyl enterephtalate (PBTB)	40 a 50
Cellulose derivaties	25 a 35
PVC hard	20 a 40
PVC soft	25 a 40
Polyethylene	25 a 60
Polypropylene	35 a 60

6. Aproximación del diseño

El cálculo de la longitud inicial fue realizado empleando (1) considerando como parámetros de entrada la frecuencia de la máquina (20 KHz) y los parámetros del material descritos en la Tabla 2. El resultado que se obtuvo fue una longitud total de 128 mm. Las longitudes $l_1 = 62$ mm y $l_2 = 66$ mm se calcularon empleando (3,4,5). En cuanto a los diámetros, se considera el diámetro de entrada D_1 en la zona de fijación con el conjunto oscilante de la herramienta actual, que tiene un diámetro de 25 mm, y se mantuvo la misma dimensión en la nueva herramienta. Para el diámetro de salida se consideró inicialmente $D_2 = 11$ mm según el análisis inicial. Sin embargo, al estimar la ganancia del sonotrodo mediante (2) se obtuvo un valor de 1: 5.1, lo que generaría una amplitud a la salida del sonotrodo de 107 μ m, lo cual resulta en un valor demasiado alto para los requisitos de la aplicación.

La ganancia requerida a la salida, con base al requerimiento, se estima en un máximo de 1:3.5, lo que resultaría en un valor máximo de ganancia de 73 μ m. Considerando que el equipo permite realizar ajustes en la amplitud de salida del convertidor de entre el 60% y el 100%, este se podrá ajustar a los valores de amplitud deseados. Por lo que empleando (2) y considerando este último factor de ganancia, se estimó el diámetro en la zona de salida $D_2 = 13.4$ mm y se integró al diseño un diámetro $D_3 = 11$ mm para permitir su adaptación a la geometría de los componentes del ensamble.

En una siguiente etapa, basados en esta aproximación dimensional y al diseño básico del sonotrodo stepped utilizado actualmente, se generó el modelo CAD incluyendo los requerimientos específicos de la aplicación los cuales son: la geometría de las piezas, el sistema de fijación al amplificador y la integración del sistema de vacío para la localización del componente. Posterior a ello las dimensiones finales de modelo CAD se ajustaron mediante el análisis FEM en el software ANSYS. Para el ajuste de las dimensiones, los diámetros de entrada y salida se mantuvieron fijos, mientras se ajustaron diferentes combinaciones de longitud l_1 , l_2 y el radio de transición. Esto con el objetivo de obtener la combinación que alcanzara el modo de vibración y frecuencia deseados. En el análisis FEM, la elección de elementos de malla adecuados son un factor importante para considerar. De acuerdo con (Dipal et al., 2011a) el uso de elementos tetraédricos definidos por 10 nodos con tres grados de libertad en cada nodo es adecuado para modelos con mallas irregulares, como las generadas en varios softwares CAD/CAE en geometrías 3D. Así mismo, (Kumarasamy, 2021) menciona que este tipo de elementos tiene un comportamiento de desplazamiento cuadrático, el cual resulta apropiado para el modelado de mallas irregulares, ya estos elementos tienen 3 grados de libertad en cada nodo y presentan capacidades como

fluencia, tensión, rigidez, plasticidad, hiper elasticidad, gran deflexión y deformación. Además, también tienen la capacidad de simular deformaciones de materiales hiperelásticos totalmente incompresibles y materiales elastoplásticos casi incompresibles. Este tipo de elementos también es utilizado por (I.Stănăşel et al., 2014), (Muhammad et al., 2022) en el diseño de sonotrodos utilizados en distintas aplicaciones. Por lo que, para el análisis en el software CAE-ANSYS, se realiza la selección de este tipo de elementos para la mallado. De igual forma, para seleccionar el tamaño adecuado de elementos se realizó el comparativo de las resultantes de deformación obtenidas en el modelo inicial, asignando diferentes tamaños de elementos para realizar el análisis de sensibilidad de malla, el comparativo de la densidad de malla y los resultados obtenidos se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5: Comparativo de resultados con base a tamaño de elementos

Tamaño de elementos	Nodos/Elementos	Deformación máxima (mm)
8 mm	3121/1773	239.96
5 mm	5814/3463	231.53
3 mm	19535/12534	231.36
2 mm	59777/40358	231.38

El tamaño de los elementos de 3 mm fue seleccionado debido a que, al reducir a 2 mm, se observa un incremento significativo en la densidad de los elementos y nodos. Esto se traduce en un incremento en los tiempos de simulación con una variación de solo 0.02 mm en el resultado de deformación máxima. En la Figura 5 se muestra el gráfico de sensibilidad de malla.

El mallado se obtuvo mediante la asignación del control de tamaño de elementos. Además, se evaluó la calidad de estos utilizando el método quality element que integra ANSYS. Este método clasifica los elementos según la relación geométrica entre el largo de la línea que forma el elemento y su volumen. El objetivo es que los elementos se asemejen lo más posible a una forma tetraédrica, asignando a estos un valor de 1 y así los elementos con grandes deformaciones que se indican con una calidad baja reciben un valor de 0. Al realizar la evaluación se obtiene una calidad de elementos promedio de 0.831 lo cual resulta en un buen indicador en la calidad de elementos de la malla.



Figura 5: Gráfico de sensibilidad de malla.

Los resultados de la aproximación dimensional obtenidos mediante el modelo computacional se muestran en la Tabla 6.

De igual forma se describe el modo de vibración alcanzado a frecuencias cercanas 20 KHz.

Tabla 6: Resultados de la aproximación dimensional en CAE

No	Longitud total (mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)	Radio (mm)	Frecuencia modo axial (Hz)	Frecuencia de modos de vibración no axial cercanos a 20 KHz	
						Inferior (Hz)	Superior (Hz)
1	128	62	67	10	22107	21362	25275
2	135	65.5	69.5	15	21058	19606	23822
3	137	67.5	69.5	20	20962	19025	23077
4	139	69.5	69.5	25	21112	18631	22403
5	139.5	67.5	72	30	20346	18484	22777
6	140	67.5	72.5	40	20936	18586	22611

De las combinaciones dimensionales propuestas, las combinaciones 3, 5 y 6 presentan modos de vibración axial a frecuencias cercanas a 20 KHz. De estas, la No. 3 presenta la aproximación dimensional más cercana al método analítico presentando un modo axial a los 20962 Hz. Así mismo la No. 5 presenta un modo de vibración axial a 20346 Hz, siendo esta la frecuencia más cercana a la frecuencia de operación de la máquina, mientras que la No. 6 presenta un modo axial a los 20963 Hz. Además, los modos de vibración cercanos a la frecuencia en modo de vibración longitudinal de estas tres combinaciones se encuentran fuera del rango de la frecuencia de operación del equipo, lo que sugiere que estas 3 combinaciones podrían resultar adecuadas para el diseño de la herramienta. Debido a esto, para poder evaluar su desempeño en una segunda etapa, se realiza el análisis armónico de estas 3 propuestas dimensionales con el objetivo de obtener los valores de amplitud y esfuerzos máximos que se pueden alcanzar en el sonotrodo, considerando como valor de entrada una amplitud de 21 μm, esto con base a la ganancia y frecuencia entregados por el amplificador del equipo. Los resultados obtenidos en el análisis armónico de los 3 sonotrodos se describen en la Tabla 7, en la cual se puede observar que la amplitud del desplazamiento máxima alcanza valores de entre 68 a 75 μm, los cuales resultarían adecuados para realizar la soldadura de los componentes. No obstante, al observar los componentes de esfuerzo en dirección axial, la mayor diferencia se observa en la combinación No. 6, que presenta un valor de esfuerzo máximo de 187 MPa, el cual es menor en comparación con las otras combinaciones analizadas. Lo cual resulta más adecuado para el desempeño de la herramienta, ya que se obtiene un factor de seguridad más alto, siendo el valor pico del esfuerzo equivalente menor al límite de esfuerzo máximo del material (510 MPa), con lo que se obtiene un factor de seguridad para el diseño de 2.72. Así mismo, el esfuerzo en la cara de contacto del sonotrodo se aproxima a cero, lo cual confirma que puede vibrar de forma libre en esta zona.

Tabla 7: Valores de deformación y esfuerzo máximo.

No.	Longitud total l ₀ (mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)	Radio (mm)	Deformación (μm)	Esfuerzo máximo (MPa)
3	137	67.5	69.5	R=20	70	218
5	139.5	67.5	72	R=30	75	243
6	140	67.5	72.5	R=40	68	187

De esta forma con base al análisis realizado se consideró la combinación No. 6 como la opción más adecuada para la

construcción del sonotrodo. Los resultados obtenidos en el análisis modal para esta combinación se muestran en las Figuras 6, 7 y 8.

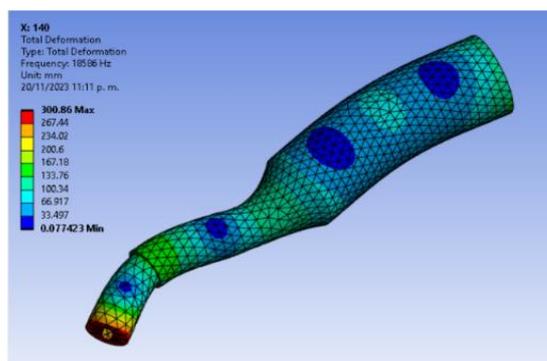


Figura 6: Modo de vibración flexión a 18586 Hz.

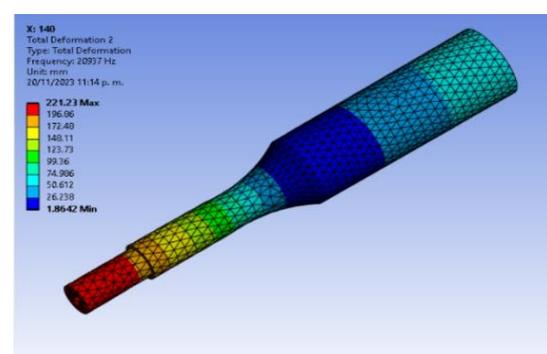


Figura 7: Modo de vibración axial a 20937 Hz.

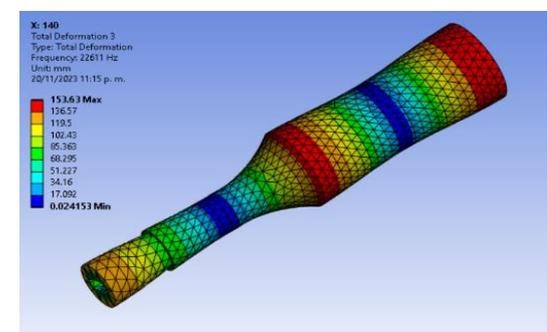


Figura 8: Modo de vibración torsión a 22611 Hz.

De igual forma los resultados de amplitud (Deformación) y esfuerzo máximo obtenidos en el análisis armónico se presentan en las Figuras 9 y 10.

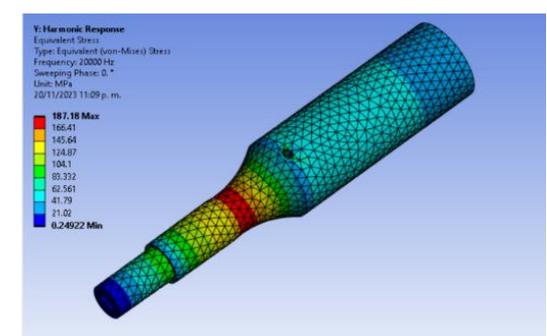


Figura 9: Deformación a 20 KHz. Análisis armónico.

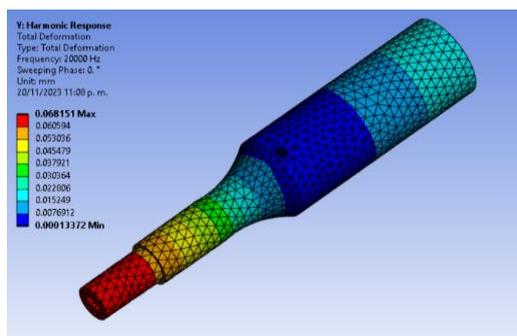


Figura 10: Esfuerzo máximo a 20 KHz. Análisis armónico.

La medición de amplitud se realiza colocando el palpador del dispositivo en la punta del sonotrodo y mediante la activación del generador se puede medir la amplitud máxima en la cara de trabajo. Este valor de amplitud representa la capacidad de la herramienta para transmitir energía a los componentes a la frecuencia de operación del equipo 20 KHz, permitiéndole generar el calor necesario para lograr la fusión de los materiales durante el proceso de soldadura, en la Figura 13 se muestra la forma de montaje del equipo durante la etapa de medición.



Figura 13: Montaje del medidor TESA.

Con el fin de establecer un comparativo entre los resultados obtenidos y la amplitud real del equipo, se realiza la medición de la amplitud entregada por el conjunto (convertidor / amplificador) a la herramienta, con el objetivo de confirmar el factor de transformación, realizando el disparo del generador de forma manual, ver Figura 14 A). Al realizar las mediciones se obtiene una amplitud a la salida del conjunto (convertidor / amplificador) de 21 μm , lo cual corresponde a los datos de placa del equipo, ver Figura 14 B).

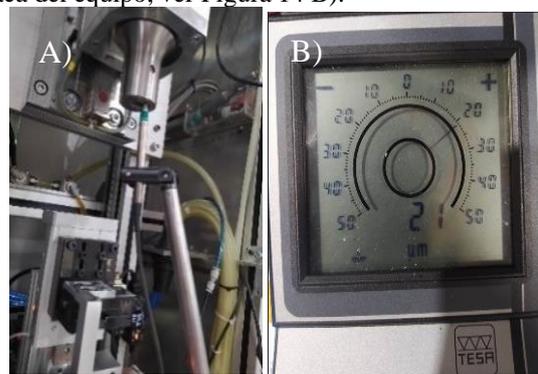


Figura 14: Medición de amplitud en el conjunto oscilante. A) Montaje del transductor en amplificador, B) Amplitud medida en amplificador.

De igual forma, se realiza el montaje de la nueva herramienta en el conjunto oscilante de la máquina y la instalación del equipo TESA para realizar la medición de la amplitud entregada en la cara de contacto del sonotrodo con el componente a soldar, la operación se realiza activando el generador en forma manual, ver Figura 15 A). El valor medido a la salida del sonotrodo a un 100% de amplitud ajustada en generador, fue de 70 μm , ver Figura 15 B). Esto permite definir que factor de transformación real de la herramienta es de 1:3.3. Además de confirmar una variación de solo 2 μm con respecto a lo calculado en el análisis FEM.

7. Confirmación experimental

Para el análisis experimental y previo a la puesta en operación, se realizó la construcción del diseño obtenido en Solid Works mediante un proceso de torneado por control numérico (CNC) y fresado convencional, el modelo CAD y la construcción final se presentan en la Figura 11.

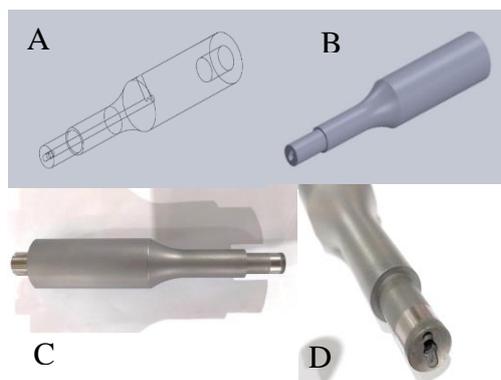


Figura 11: Modelado y fabricación del sonotrodo. A) Modelo CAD vista estructura alámbrica, B) Modelo CAD vista sombreado aristas ocultas, C) Sonotrodo fabricación final, D) Sonotrodo sistema de vacío.

Para realizar el proceso de validación experimental, se utiliza un medidor de desplazamiento (amplitud) TESA 04430008 presentado en la Figura 12, con ayuda de este instrumento, se pueden medir desplazamientos desde 0.01 μm , lo cual resulta adecuado para los rangos de medición que se desean evaluar.

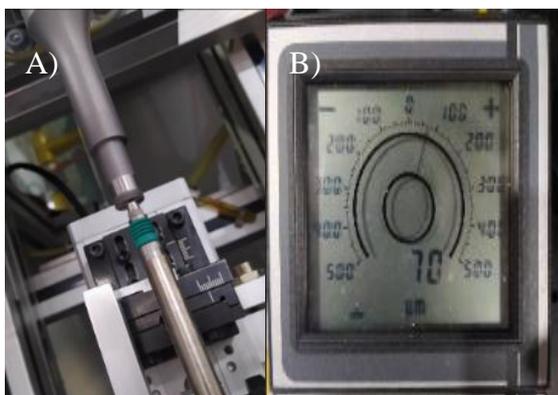


Figura 12: Medidor de desplazamiento TESA04430008.



Figura 15: Medición de amplitud en el nuevo sonotrodo. A) Montaje del transductor en sonotrodo, B) Amplitud medida en sonotrodo.

Asimismo, con el objetivo de observar si la herramienta presenta algún desplazamiento no axial, se colocó el medidor en la cara lateral del sonotrodo y se realizó la medición, ver Figura 16 A). Durante esta prueba, no se obtuvo algún valor de medición con lo que se confirma que no se presenta algún desplazamiento no axial, ver Figura 16 B).

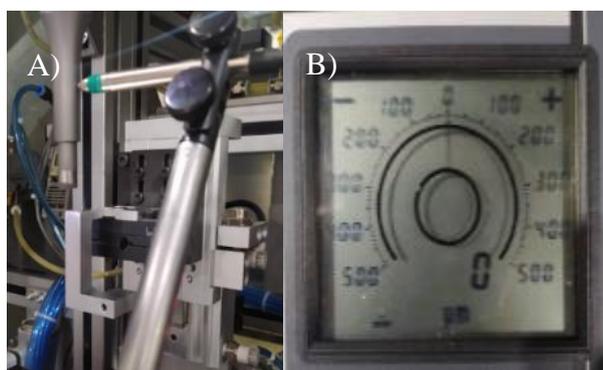


Figura 16: Confirmación de desplazamiento no axial. A) Montaje del transductor en sonotrodo, B) Amplitud medida en sonotrodo.

Finalmente, para evaluar la funcionalidad del sistema de localización de los componentes durante el ensamble, se instaló en la máquina una válvula de vacío SMC ZL212-K15LZ-DPPL-X132. Esta válvula genera vacío mediante un sistema Venturi se operada mediante una electroválvula. Adicional, se utiliza una señal digital del controlador lógico programable para su activación. La salida de vacío de la válvula es conectada al sonotrodo mediante una manguera neumática de 4mm. Esto con el objetivo de mantener la pieza en posición durante el proceso de ensamble de los componentes. El sistema presentó buenos resultados para mantener la posición y orientación de los componentes durante el proceso de ensamble, tanto en la aplicación actual, ver Figura 17 A), así como en la nueva aplicación mostrado en la Figura 17 B). Asimismo, se confirmó que las dimensiones de la nueva herramienta resultan adecuadas para poder operar con la combinación actual de componentes sin generar algún daño, por lo que, esta nueva herramienta reemplazará a la actual, eliminando los tiempos muertos generados por el cambio de herramienta al momento del cambio de modelo en la estación.

De igual forma una vez definidos los parámetros de operación del equipo se confirmó el correcto desempeño de la herramienta para realizar el proceso de soldadura por ultrasonido sobre ambas combinaciones de componentes.



Figura 17: Sistema de posicionamiento. A) Posicionamiento nuevo componente, B) Posicionamiento componente actual.

8. Conclusiones

En esta investigación, se realizó el diseño, simulación y fabricación de un sonotrodo que permitió la soldadura de dos combinaciones de componentes a través del correcto entendimiento del proceso de diseño de este tipo de herramientas y el uso de softwares CAD y CAE, mediante los cuales se logró obtener un diseño óptimo que asegura la uniformidad de la amplitud transmitida por el sonotrodo a la pieza durante el proceso de soldadura, sin comprometer su integridad.

Mediante el análisis FEM en el software ANSYS, se definió la combinación adecuada de parámetros para lograr que el sonotrodo pueda operar en un modo de vibración axial a frecuencias cercanas a 20 KHz. Se aseguró también que este se mantiene aislado de algún otro modo de vibración no axial que pueda afectar su operación segura. A través del análisis armónico, se obtuvieron los valores teóricos de amplitud y de esfuerzo máximos generados en la herramienta, confirmando que el sonotrodo alcanza los valores de amplitud requerido para la aplicación propuesta. Adicional se verificó que este podrá trabajar de forma segura al confirmar que los esfuerzos máximos calculados no superan el límite de resistencia a la fatiga del material propuesto para su fabricación.

El uso de estas herramientas también permitió evaluar el impacto que la integración del sistema de vacío puede generar sobre el diseño y comportamiento dinámico del sonotrodo. Durante el análisis se observó que este sistema genera una mayor concentración de esfuerzos en la zona del radio de transición, por lo que al tener un mayor radio en esta zona ayuda a mejorar las condiciones estructurales del sonotrodo.

Durante el análisis experimental se obtuvieron valores de amplitud cercanos a los obtenidos mediante el análisis en el FEM, con una variación de solo 2 μm, lo que confirma la efectividad del uso del diseño computacional para el diseño de sonotrodos.

A través de esta investigación, fue posible entender el comportamiento de un sonotrodo de soldadura por ultrasonido mediante la aplicación de métodos de análisis dinámicos como al análisis modal y armónico.

En el presente trabajo, se propuso una metodología para el diseño, simulación de un sonotrodo. Los resultados obtenidos han demostrado que la metodología propuesta permite el correcto diseño de este tipo de herramientas. Sin embargo, esta metodología se limita únicamente a sonotrodos construidos por

un solo elemento. El diseño de sonotrodos compuestos por más elementos requiere consideraciones adicionales. Además, se requiere de un conocimiento adecuado del proceso y la aplicación para poder definir de manera correcta las consideraciones del diseño, como las condiciones de frontera, los materiales y las condiciones del ensamble. Por último, se recomienda realizar el diseño de este tipo de herramientas en las etapas iniciales de desarrollo del producto, de tal forma que se pueda integrar al diseño de los componentes, la selección del equipo y de otros herramientas como una parte modular del mismo.

Agradecimientos

Agradecimiento especial al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) y al programa de Maestría en Ingeniería ofrecido por el Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán (TESJO) por el apoyo recibido durante el desarrollo y culminación del presente proyecto de investigación.

Referencias

- Derks Pierre Louis Léonard Marie. (1984). The design of ultrasonic resonators with wide output cross-sections. [Tesis de doctorado, Technische Hogeschool Eindhoven].
DOI: 10.6100/IR34306
- Dipal.A M.Patel, B.Avadhoot U.Rajurkar. (2011a). Analysis of different shaped sonotrodes used for plastic welding. Institute of technology. Intitute of technology Nirma University, Ahmedabad-382-481.
- Dipal M. Patel, Avadhoot U. Rajurkar. (2011b). Finite element analysis assisted design of ultrasonic horn for plastic welding. Proceedings of the international conference on computational methods in manufacturing. 38421, 97-102.
- Djo Bakadisha, YA Gang. (2018). Experimental design and optimization of conical horn of ultrasonic amplitude. International Journal of advanced Engineering Research and science.
DOI: 10.22161/ijaers.5.6.15
- Flores Esteban, Ruiz Nelson Iván. (2014). Aplicaciones industriales del Ultrasonido. Departamento de Electrónica y Automática, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de San Juan.
- Hahn M., Cho, Jang Y, Kim G.B. (2021). Optimal design and experimental verification of ultrasonic cutting horn for ceramic composite material. Appl. Sci. 2021, 11(4), 1-13.
DOI: 10.3390/app11041954
- Hammed H., Asif M., Ali A., Ahmad F. (2021). Numerical evaluation of state of the art horn designs for rotary ultrasonic vibration assisted machining of nomex honeycomb composite. Research square.
DOI: 10.21203/rs.3.rs-207300/v1
- Horn Catalog Branson. (2023), obtenido de:
<https://www.emerson.com/documents/automation/catalog-ultrasonic-horn-branson-en-us-160126.pdf>.
- Stănășel I. Buidos T., Blaga F. (2014). Design and FEM simulation of ultrasonic welding horn. Romanian Association of Nonconventional Technologies 1, 51-58.
- Grabalosa J, Ferrer I, Martínez Romero O, Elías Zúñiga A, Plantá X, Rivillas F. (2015). Assessing a stepped sonotrode in ultrasonic molding technology. Journal of materials processing technology. 229, 687-696
DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.10.023
- Kanwal J.S., Vinod K.S. (2014). Finite element analysis of ultrasonic machine tool. International journal of engineering research & technology (IJERT). 3, 1647-1650.
DOI: 10.17577/IJERTV3IS070646
- Kenneth A.Holt, Herrmann Ultrasonics, Inc. Ultrasonic Plastic We. (2006). Weld processing modes, their descriptions, functions, and applications, obtenido de:
<https://plasticsdecorating.com/articles/2006/ultrasonic-plastic-welding-weld-processing-modes-their-descriptions-functions-and-applications/>
- Kuen-Ming Shu, Jyun - Wei Chen. (2015). The design of acoustic horns for ultrasonic aided tube double side flange making. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering 9, 904-907.
- Kuman Aman Parshad, Komal G.Dave, Samir B.Shah. (2018). Design and analysis of sonotrode for ultrasonic consolidation. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR) 5, 506-515, ISSN-2349-5162
- Kumarasamy Anand. (2017). Design and optimization of slotted block horn utilized in ultrasonic insertion process through rsm-fea-ga integration technique. Researche square 1, 1-32.
DOI: 10.21203/rs.3.rs-260954/v1
- Kumar S., Wu C.S., Padhy G.K., Ding W. (2017). Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review. Elsevier Journal of Manufacturing Processes 26, 295-322.
DOI: 10.1016/j.jmappro.2017.02.027
- Kumar S., Ding W., Sun Z., Wu C.S. (2018). Analysis of the dynamic performance of a complex ultrasonic horn for application in friction stir welding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 97, 1269–1284.
DOI: 10.1007/s00170-018-2003-0
- Lucas M., Smith A.C. (1997). Redesign of ultrasonic block horns for improved vibration performance. ASME. J. Vib. Acoust. 119, 410-414.
DOI: 10.1115/1.2889739
- Mubashir M., Mutahir R., Shoaib Ur Rehman M. (2022). Design and analysis of hollow catenoidal horn profile for ultrasonic machining of composite materials. Journal of Studies in Science and Engineering 2, 18-32.
DOI: 10.53898/josse2022222
- Pradeep Kumar J, Prakasan K. (2018). Acoustic horn design for joining metallic wire with flat metallic sheet by ultrasonic vibrations. Journal of vibroengineering 20, 2758-2770.
DOI: 10.21595/jve.2018.19648
- Praveen K.R., Rabindra K.P., Vinod Y.. (2017). Modal analysis of horns used in ultrasonic machine. ELK Asia Pacific Journals 978-93-85537-06-6.
- Rani M., Rudramoorthy R. (2013) Computational modeling and experimental studies of the dynamic performance of ultrasonic horn profiles used in plastic welding. Ultrasonics 53, 763–772.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2012.11.003>
- Subhankar R, Jagadish. (2017). Design of a circular hollow ultrasonic horn for USM using finite element analysis. International journal of advanced manufacturing technology 93, 319-328.
DOI: 10.1007/s00170-016-8985-6
- Sharang K, Tanuj J., Gope P.C. (2018). Design and analysis of sonotrode for ultrasonic eye-punching process. International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET) 9, 1276–1283.
- Suresh Kumar V P, Manikandan N. (2017). Design and analysis of ultrasonic welding horn using finite element analysis. Research gate, International Journal of Engineering Science Technology and Research (IJESTR) 2, 74-87, ISSN: 2456 – 0464.
- Titanium Processing Center. (2023). Titanium Distributor. (n.d.). ASM Aerospace Specification Metals. Retrieved Jun 19, 2023, de <https://aerospacemetals.com/titanium-distributor/>
- Venkata Vara Lakshmi Kothuru, Venkata Subrahmanyam Sistla, Irfan Hussain Mohammed and Arvind Jagana. (2022). Design and numerical analysis of rectangular sonotrode for ultrasonic welding. Trends in sciences 19, 4215.
DOI: 10.48048/tis.2022.4215
- Vivekananda K, Arka G.N, Sahoo S.K. (2014). Design and analysis of ultrasonic vibratory tool (UVT) using FEM, and experimental study on ultrasonic vibration-assisted turning (UAT). Science Direct. Procedia Engineering 97, 1178 - 1186.
DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.396
- Xiao Chung-fang, Han Bing. (2018). Research and design of ultra long ultrasonic horn. Crimson publishers wings to the research 7, 719-727. ISSN: 2576-8840.
DOI: 10.31031/RDMS.2018.07.000661