

design and construction of a prototype linear friction stir welding machine for acrylic.

Diseño y construcción de un prototipo de máquina de soldadura por fricción lineal de acrílico

Rodrigo Toasa Jimenes¹ Angel Arias Perez² Abrahan Jorque Rea³ Daniel Casaliglia Gordon³

¹Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador
E-mail: rodrigopatricio89@gmail.com

²Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga, Ecuador
E-mail: axarias@espe.edu.ec

³Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
E-mail: abrahan.jorque@epn.edu.ec

⁴Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
E-mail: daniel.casaliglia@epn.edu.ec

RESUMEN

El objetivo principal fue diseñar y construir un prototipo de máquina de soldadura por fricción lineal para unir acrílico, aportando a la industria una mejor opción al momento de unir este material, para el diseño mecánico se determinaron los parámetros de soldadura para poder realizar esta unión en el acrílico, el método inicial fue una simulación por el método de elementos finitos, se seleccionó el mecanismo más adecuado para un correcto funcionamiento de la máquina, se realizó un modelo CAD optimizado con el cuál posteriormente se realizaron análisis de esfuerzos en los elementos de mecanismo, se realizó la construcción y ensamblado del prototipo de la máquina, con el que se realizaron pruebas para poder comprobar que los parámetros obtenidos durante las simulaciones son las correctas para realizar la soldadura por fricción lineal. Los resultados de las pruebas indican que para soldar placas de acrílico con la máquina construida se debe aplicar una frecuencia de vibración de 100 Hz y una amplitud de 4mm, valores fijos en la máquina, una presión mayor a 1,1 MPa y tiempos de soldadura mayores a 8 segundos. Se realizaron ensayos de resistencia a la tracción e impacto de probetas soldadas por fricción lineal, y se

compararon con probetas enteras sin soldar. Se determinó que la resistencia a la tracción de la zona de soldadura es 5% inferior en comparación a material base de acrílico, pero apenas alcanza el 12% de la resistencia al impacto del material base.

Palabras claves: Fricción lineal, soldadura de acrílico, presión, esfuerzo, simulación.

ABSTRACT

The main objective was to design and build a prototype of a linear friction welding machine to join acrylic, giving the industry a better option when joining this material, for the mechanical design the welding parameters were determined to be able to perform this union in acrylic, the initial method was simulation by the finite element method, The most appropriate mechanism was selected for the correct operation of the machine, an optimized CAD model was made with which later stress analysis was performed on the mechanism elements, the construction and assembly of the prototype machine was carried out, with which tests were performed to verify that the parameters obtained during the simulations are correct to perform the linear friction welding. The results of the tests indicate that in order to

weld acrylic plates with the machine built, a vibration frequency of 100 Hz and an amplitude of 4 mm, fixed values in the machine, a pressure greater than 1.1 MPa and welding times greater than 8 seconds should be applied. Tensile strength and impact tests were performed on linear friction welded specimens and compared with whole unwelded specimens. It was determined that the tensile strength of the weld zone is 5% lower compared to the acrylic base material, but only reaches 12% of the impact strength of the base material.

Key Words: Linear friction, acrylic welding, pressure, stress, simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Existen varios métodos para soldar piezas plásticas. Todas las variables, como el material, el diseño y las condiciones en las que se utilizará el producto final, incluyendo el coste del proceso, deben tenerse en cuenta a la hora de decidir qué técnica de soldadura escoger. Los polímeros pueden fundirse, y por tanto soldarse, utilizando relativamente poca energía. El calor, la fricción e incluso las vibraciones ultrasónicas y las radiofrecuencias pueden utilizarse para crear la fusión necesaria para una soldadura de polímero. Los métodos de soldadura incluyen por ultrasonidos, por placa caliente, por giro, vibración y láser.

La soldadura no requiere materiales adicionales, con una excepción: la soldadura electro magnética, que requiere consumibles de agentes adhesivos [1].

La revolución industrial avanza con una amplia utilización de los materiales ligeros para fabricar piezas utilizando termoplásticos, polímeros reforzados con fibras y otros metales ligeros en el transporte, la construcción, el automóvil, la aeronáutica, el espacio, entre otros.

Debido al gran grado de libertad en la fabricación de formas complejas, la selección adecuada de los parámetros de entrada de la soldadura en FSW puede mejorar las propiedades de las juntas de soldadura de polímeros ligeros [2] [3].

Existen nuevas técnicas como la llamada FFSJ unión de relleno por fricción para unir láminas de aleación de aluminio 6082-T6 y de polímero de polipropileno [4], la soldadura y el procesamiento por fricción (FSW/FSP) son técnicas de unión y procesamiento en estado sólido relativamente nuevas. En particular, se han utilizado para unir y procesar aleaciones de aluminio aeroespacial de alta resistencia y otras aleaciones metálicas que son difíciles de soldar mediante la soldadura de fusión convencional. Recientemente, la FSW/FSP se ha desarrollado para unir y procesar materiales poliméricos [5], la soldadura por fricción (FSW) es uno de los procesos de soldadura por fricción que puede utilizarse para reparaciones menores de piezas de ensamblaje, estructuras de ingeniería civil e implantes y andamios [6], la soldadura por puntos por fricción (FSSW) es un aspecto esencial de la soldadura por fricción tradicional (FSW). En comparación con los métodos de soldadura estándar, este método crea uniones de alta calidad. La FSSW es una técnica de soldadura moderna que se utiliza para soldar materiales poliméricos que son difíciles de soldar con los métodos de soldadura habituales. El HDPE (polietileno de alta densidad) es un material plástico con notables características. El HDPE es actualmente el material más utilizado en diversos procesos de fabricación [7].

El crecimiento exponencial de la industria ha obligado a innovar el desarrollo de los materiales, elementos y piezas que anteriormente solo se fabricaban con algún tipo de metal, en la actualidad han sido sustituidos por materiales no metálicos, polímeros, cerámicas, y otros materiales que han mejorado la eficiencia de los sistemas mecánicos.

El Polipropileno, Policarbonato, ABS, PVC, Nylon, etc., son los termoplásticos que más se usan en la industria [8]. Además, en los últimos años se han desarrollado muchas aplicaciones como uniones soldadas por fricción de materiales plásticos con refuerzo de polvo metálico en donde lo más importante a saber es la velocidad de rotación, velocidad de avance, tiempo de soldadura [9].

Debido al creciente desarrollo en la industria de los polímeros y sus aplicaciones en los diversos campos de la industria, y los métodos convencionales no muy eficientes para su fusión, llevan a investigar y analizar los nuevos métodos de soldadura para polímeros que se están desarrollando actualmente. Durante mucho tiempo el método más usado para la unión de polímeros, ha sido mediante la adición de compuestos químicos en las juntas a ser unidas, sin embargo, este proceso requiere de un material de diferentes características a las de los materiales base, lo cual implica propiedades mecánicas y químicas diferentes a las deseadas [10].

La principal ventaja de los termoplásticos es fácil de moldear, pero en algunas aplicaciones durante su fabricación se requiere algún método de unión, Existen muchos métodos de unión que pueden usarse (por ejemplo, adhesivos o cementos solventes) pero los métodos que tienen más éxito son aquellos que hacen uso de las propiedades inherentes de los materiales. La soldadura por fricción es única en este aspecto, cabe mencionar que los polímeros termoestables no se ablandan con el calor, por lo cual deben unirse mediante métodos alternativos [11]. Una de las ventajas de la soldadura por fricción es un proceso limpio, es decir, no genera gases ni residuos que pueden resultar relativamente perjudiciales al entrar en contacto con el medio ambiente, y por lo tanto perjudican la salud humana.

La soldadura por fricción lineal (vibración), utiliza el

calor generado por la fricción en la interfaz de dos materiales para producir la fusión en el área interfacial lo cual se puede observar en la figura 1. Los materiales fundidos fluyen juntos bajo presión, formando una soldadura al enfriarse. La soldadura por vibración se puede lograr en poco tiempo (tiempo de ciclo de 1 a 10 segundos) y es aplicable a una variedad de piezas termoplásticas con superficies planas o ligeramente curvadas [12].

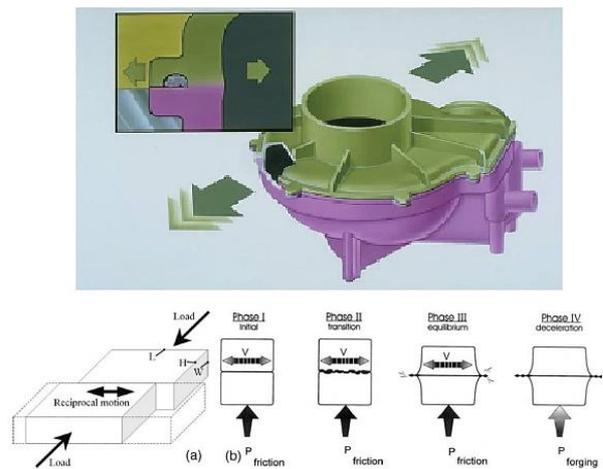


Figura 1: Proceso de la soldadura por fricción lineal. Fuente: Handbook of plastics joining: a practical guide. Troughton (2008)

La mayoría de las máquinas industriales de soldadura por vibración funcionan a frecuencias de soldadura de 100 a 240 Hz. La amplitud de la vibración, producida por la excitación de un sistema calibrado de masa-resorte, generalmente es inferior a 5 mm (0.2 pulgadas); el tiempo de soldadura varía de 1 a 10 segundos, con tiempos de solidificación, después de que el movimiento vibratorio ha cesado, generalmente de 4 a 10 segundos [13].

Para fundir el material en la interfaz de unión, se debe introducir una cantidad de energía específica para el material. Esto es proporcional a la velocidad de fricción entre las dos partes. En la práctica, la determinación de la velocidad de fricción máxima entre las superficies de acoplamiento, (V), resulta útil. Se calcula a partir de la amplitud pico a pico (a), en mm y la frecuencia (f) en Hz:

$$v = 2af \quad (1)$$

En general, la velocidad para soldar debe estar entre 500 y 1000 mm/s (20–40 pulgadas/s). En los últimos años, se emplean un software de Elementos Finitos, para desarrollar los modelos de simulación para analizar distintos procesos, como la soldadura por fricción, en función de las capacidades robustas del software para resolver problemas térmicos o termo mecánicos transitorios. Estas técnicas computacionales especiales se utilizan en estos modelos para tratar las peculiaridades de la soldadura por fricción [14].

Por lo general, se considera que el contacto en FW sigue la ley de fricción de Coulomb convencional, es decir, el esfuerzo cortante de la interfaz de contacto se expresa de la siguiente manera [14]:

$$\tau_{fric} = \mu P \quad (2)$$

Donde τ_{fric} es el esfuerzo cortante de fricción, μ el coeficiente de fricción y P la presión de contacto normal. Por lo tanto, la generación de calor a partir de la fricción se describe de la siguiente manera:

$$q_{fric} = n v \tau_{fric} = n v \mu P \quad (3)$$

Donde v es la velocidad de deslizamiento, que puede depender de la posición relativa en diferentes procesos FW que tienen varias formas de movimiento, n la eficiencia de conversión de calor. El coeficiente de fricción podría ser una variable dependiente de la temperatura de la interfaz, la velocidad de deslizamiento relativa entre las dos superficies de desgaste y la presión normal. Sin embargo, para FW, la ley de fricción de Coulomb convencional solo se aplicará al comienzo de la soldadura cuando la temperatura de la interfaz sea relativamente baja. A medida que el material plastificado de la interfaz se va formando en volúmenes más grandes a temperaturas elevadas, el comportamiento de fricción estará

dominado por la fricción viscoplástica. Por lo tanto, la generación de calor depende de la intensa deformación plástica de la delgada capa de corte en la interfaz. Luego se aplica la ley de fricción de Coulomb modificada, donde el esfuerzo de fluencia se utiliza de la siguiente manera [14]:

$$\tau_{fric} = \tau_{cort} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

Donde τ_{cort} es el esfuerzo cortante de fluencia calculado a partir del esfuerzo de fluencia equivalente del material σ_s . Por lo tanto, la generación de calor (q) durante FW podría expresarse de la siguiente manera [14]:

$$q = n v \text{Min}(\mu P, \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}) \quad (5)$$

En la mayoría de las circunstancias, el calor por fricción al principio se usa para crear el campo de temperatura inicial y es seguido por la generación de calor a partir de la deformación plástica. En otras palabras, según la teoría de la fricción, el comportamiento de fricción convencional podría tomarse como la deformación plástica local de las asperezas de las superficies de contacto, luego la generación de calor durante FW se define como [14]:

$$q = \frac{n v \sigma_s}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del prototipo de soldadura por fricción lineal se realizó el proceso descrito en la siguiente figura 2.

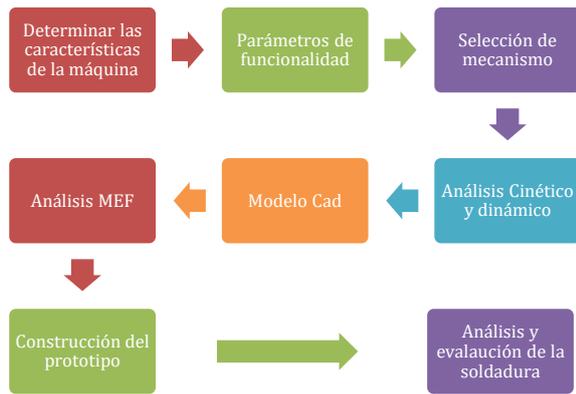


Figura 2: Proceso de diseño y construcción del prototipo de soldadura por fricción lineal.

2.1. Características de la máquina

Las máquinas de soldadura por fricción lineal tienen tres sistemas principales que los conforman, los cuales son: un conjunto vibrador, una mesa elevadora y herramientas de sujeción.

El conjunto vibrador es un mecanismo que genera el movimiento lineal alternativo durante el proceso de soldadura, para esta investigación se recurrirá a utilizar un sistema electromecánico para generar la vibración, es decir; se utilizará un motor eléctrico para generar el movimiento circular y se seleccionará un mecanismo que lo transforme en movimiento lineal.

La mesa elevadora es la parte de la máquina que realiza el desplazamiento vertical entre las piezas a soldar generando una presión la una con la otra, este movimiento, en la máquina a desarrollarse se realizará mediante un sistema hidráulico simple donde se ubicará un manómetro para indicar la presión utilizada.

Las herramientas de sujeción se usan para sujetar las piezas a soldar; esta parte de la máquina es simple pero importante ya que debe asegurar la posición de los materiales durante todo el proceso de la soldadura.

2.2. Parámetros de funcionalidad

En la tabla 1, se indican los parámetros y magnitudes que la máquina de soldadura por fricción lineal debe cumplir para poder realizar uniones eficientes.

Tabla 1.
Parámetros de soldadura.

Parámetros	Valores
Frecuencia	100 Hz
Amplitud	4 mm
Presión	0 – 1 MPa.

Fuente: Propia

Con esta información se recurrirá a hacer simulaciones de soldadura por fricción lineal en el software CAE ABAQUS con licencia de estudiante, por lo cual se deben realizar modelados y mallados de placas de acrílico que se van a analizar.

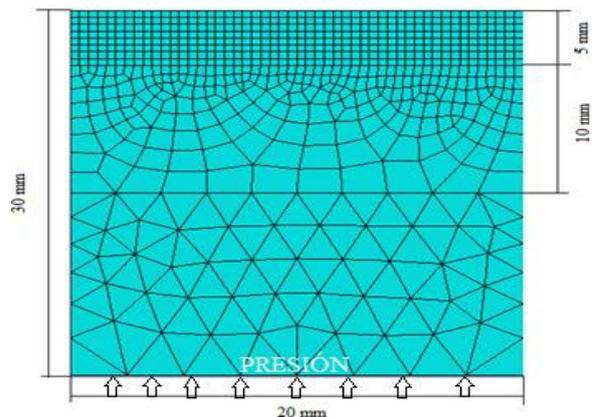


Figura 3: Placa de acrílico superior

En la figura 3, se observan las medidas de la pieza de acrílico que se quiere unir, el cual tiene 3 particiones para realizar un mejor mallado del elemento, donde en la zona de soldadura se realizó un mallado más refinado para obtener resultados más precisos, en esta pieza de acrílico existen 744 nodos y 749 elementos en total. En la zona de malla más refinada se usaron elementos de 0.63mm con 4 nodos.

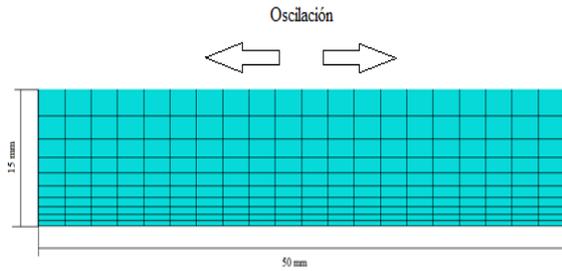


Figura 4: Placa de acrílico superior

En la figura 4, se indican las medidas y el mallado de la placa inferior de acrílico que se va a unir, se tiene un mallado menos preciso en comparación al anterior, esto se hizo para tener una reducción en la carga computacional y debido a la restricción de la licencia de estudiante que ofrece el software, se malló con 231 nodos y 200 elementos cuadriculados.

Durante las simulaciones se usaron espesores de las placas de 2mm, 5mm y 10 mm. El resultado que se ve en la figura 5, se simuló la soldadura por fricción lineal de placas de 2mm de espesor, con los parámetros indicados en la tabla 1, se observa que en un tiempo de 2,85 segundos en la zona de soldadura se llegan a tener temperaturas superiores a 156 °C, por tanto, se llega a superar la temperatura de vitrificación del acrílico e indica que con estos parámetros se pueden llegar a obtener soldaduras efectivas con este método de unión, se obtuvieron resultados similares para los otros espesores de placas de acrílico.

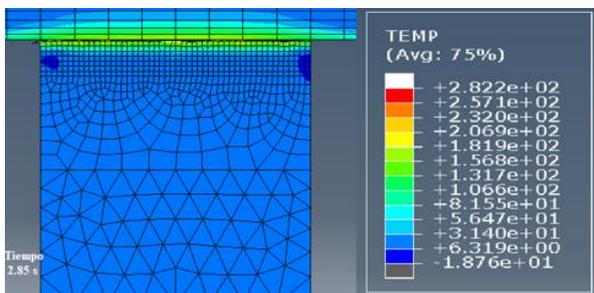


Figura 5: Resultado de la soldadura por fricción lineal en placas de acrílico de 2mm.

2.3. Selección de mecanismo

Para el mecanismo de la mesa vibradora se tomaron en consideración 2 mecanismos, el

mecanismo biela manivela corredera y el mecanismo de leva circular excéntrica, por tanto, se realizó un análisis cinemático y dinámico entre estos dos tipos de mecanismos.

Para los análisis se realizaron modelos CAD (Figura 6), en el software INVENTOR con licencia estudiantil, y el análisis cinemático y dinámico se los realizó en el software ADAMS.

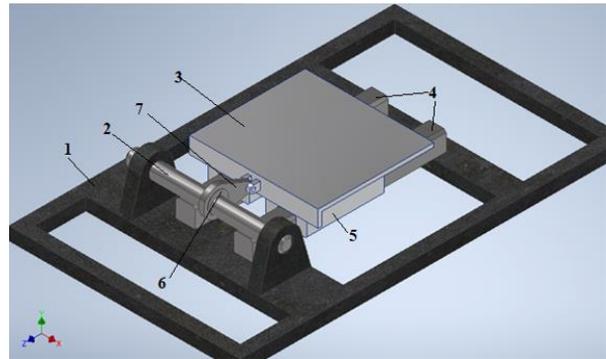


Figura 6: Modelo CAD del mecanismo biela manivela corredera con manivela excéntrica al eje con 2 mm, 1) Estructura base, 2) Eje, 3) Mesa de soldadura, 4) Rieles, 5) Deslizador, 6) Leva circular excéntrica, 7) Biela.

El mecanismo biela manivela corredera fue el seleccionado debido a que tiene mayor precisión en el movimiento, su funcionamiento es más suave y no se generan picos de aceleraciones que pueden traducirse en vibraciones excesivas.

2.4. Análisis cinemático y dinámico

Los valores del desplazamiento, velocidad y aceleración se ven en la figura 7, donde se observa que el desplazamiento es de 4mm, que es lo que se requiere para la amplitud de vibración, la velocidad es de forma sinusoidal, y se llega a valores picos de 1250 mm/s, y la aceleración también tiene la misma forma y con valor pico de $77,5 \times 10^5$ mm/seg².

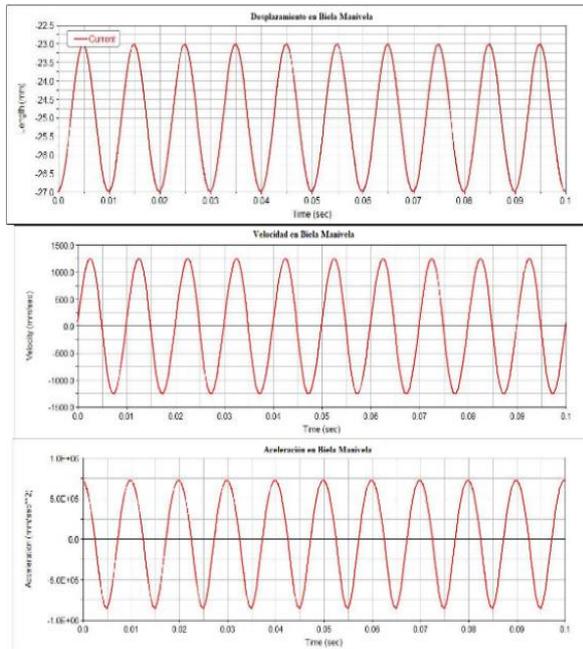


Figura 7: Valores de desplazamiento, velocidad y aceleración del mecanismo biela manivela corredera.

También se analizó el torque requerido por el motor para poder accionar la máquina, este torque al funcionamiento en vacío es menor en el mecanismo de biela manivela corredera como se puede ver en la figura 8.

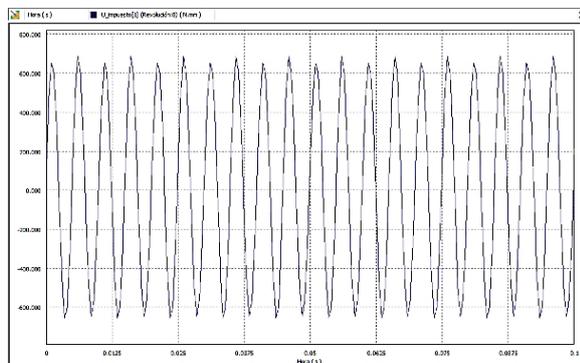


Figura 8: Torque requerido por el mecanismo biela manivela en vacío.

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

3.1. Modelo CAD

Se realizó un nuevo modelo CAD optimizado y se incorporaron los nuevos elementos para su funcionamiento este modelo se puede observar en la siguiente figura 9.

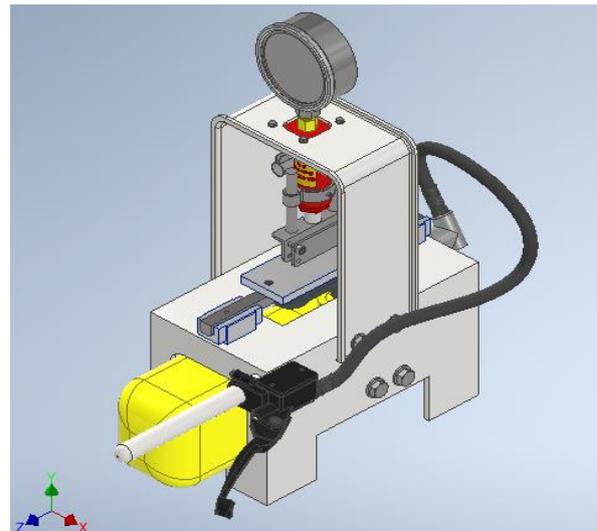


Figura 9: Modelo CAD del prototipo de soldadura por fricción lineal.

En el modelo CAD se observan los tres componentes de las máquinas de soldadura por fricción lineal, la mesa vibradora (mecanismo biela manivela corredera), el sistema elevador hecho con una gata hidráulica de hasta 3 toneladas, las mordazas de sujeción y un sistema de frenado hidráulico.

El motor que se usó para el accionamiento de la máquina es una amoladora DEWALT D28499X ya que este puede girar a 6000 RPM es decir tienen una frecuencia de rotación de 100 Hz, y puede suministrar hasta 6 N-m de torque.

3.2. Análisis MEF de esfuerzos

Los elementos que conforman el mecanismo de la mesa vibradora deben resistir los esfuerzos presentes durante el funcionamiento de la máquina por el cual se realizaron análisis de esfuerzos mediante MEF en el software INVENTOR ya que éste posee una integración del análisis dinámico y de tensiones, obteniéndose los siguientes coeficientes de seguridad con la carga máxima de 900N que se puede aplicar en la máquina para obtener coeficientes de seguridad iguales o superiores a 2.

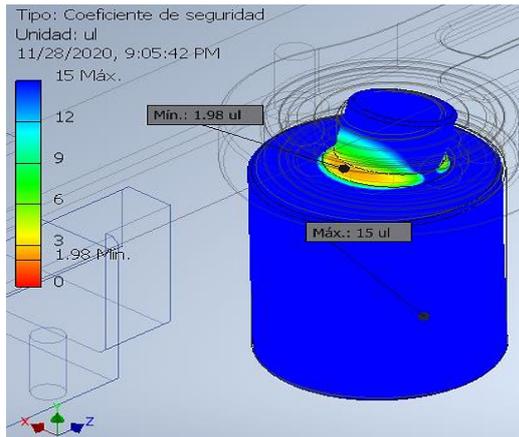


Figura 10: Coeficiente de seguridad del acople excéntrico con carga máxima.

En el elemento del mecanismo biela manivela corredera se tienen que él acople excéntrico tiene un coeficiente de seguridad de 1.98 el cuál es un valor muy cercano a 2, y puede tomarse como aceptable.

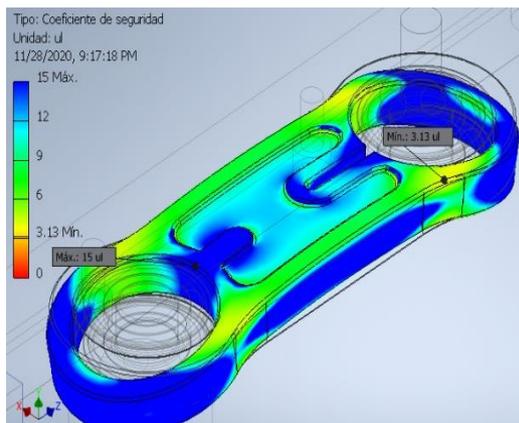


Figura 11: Coeficiente de seguridad en la biela del mecanismo con carga máxima.

El valor del coeficiente de seguridad en la biela del mecanismo es de 3.13 en el lugar que indica la figura 11, siendo éste un diseño aceptable.

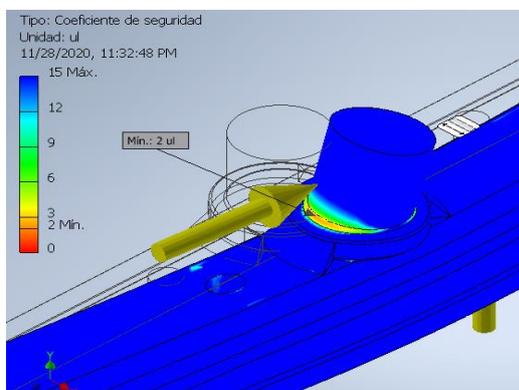


Figura 12: Coeficiente de seguridad en la biela del mecanismo con carga máxima.

En el ensamble del riel y el pasador para la biela se obtiene un coeficiente de 2 en la zona indicada por la figura 12.

3.3. Construcción

En esta etapa es necesario realizar la construcción de algunos elementos como los que se ven en la siguiente tabla.

Tabla 2:
Elementos y materiales para la construcción

Componente	Material
Mesa estructural	Plancha de acero A36 laminada en caliente.
Soporte de la gata hidráulica	Plancha de acero A36 laminada en caliente.
Mordazas	Plancha de acero A36 laminada en caliente.
Acople excéntrico	Hierro fundido
Biela	Hierro fundido
Pasador	Barra de acero AISI 4340
Guías	Barra de Acero A36
Mini mesa soporte para soldadura	Aluminio

Luego se obtuvieron los elementos que se pueden encontrar en el mercado como son: el motor, riel y deslizadores HG5, la bomba de freno de motocicleta, el cilindro esclavo de embrague de Chevrolet Aveo 2006, la gata hidráulica y los rodamientos SKF.

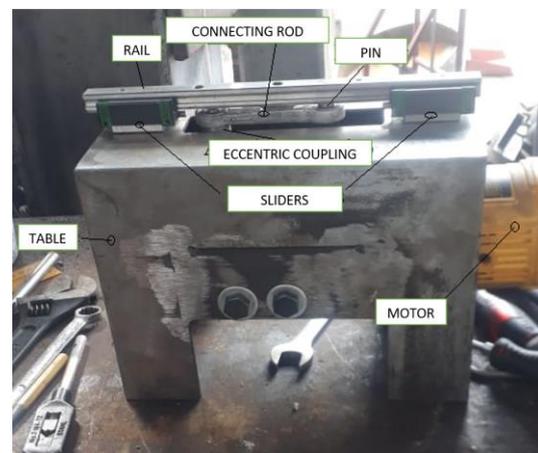


Figura 13: Ensamblado del mecanismo a la estructura.

En la figura 13, se muestra el ensamblaje del mecanismo biela manivela corredera con la estructura y el motor.



Figura 14: Ensamblado de la mesa elevadora.

En la figura 14, se observan los elementos que conforman el mecanismo elevador de la máquina con la mordaza.



Figura 15: Ensamblado de la mesa elevadora.

Se ensambló el sistema de frenado para la máquina, este sistema fue necesario implementarlo debido a que el movimiento generado por el mecanismo debe detenerse lo más rápido posible, este sistema se ve en la figura 15.



Figura 16: Ensamblado de la mesa elevadora.

Finalmente se realizó el proceso de pintado a la máquina y pruebas de encendido y apagado del prototipo, en la figura 16 se observa el prototipo acabado.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las pruebas realizadas en el prototipo de soldadura por fricción lineal de acrílico se muestran en esta sección.

4.1. Resultados

La máquina de soldadura por fricción lineal fue concebida para realizar soldaduras de forma perpendicular como se muestra en la siguiente figura 17.



Figura 17: Ensamblado de la mesa elevadora.

4.1.1. Parámetros de soldadura

Se recolectó la información de las pruebas de soldadura y se las presenta en la tabla 3. En ésta tabla se puede observar la información de la geometría de los materiales a unir, la información que proporciona la máquina donde se puede ver la presión indicada del manómetro y el área del cilindro de la gata hidráulica, esta información es importante en los cálculos de parámetros de la soldadura, debido a que la presión que se observa en el manómetro de la máquina y es la presión del aceite en el interior de la gata hidráulica, y ésta

presión genera una fuerza debido al empuje del fluido sobre el cilindro, y ésta fuerza mantiene el contacto de las piezas a soldar, por lo cual se puede calcular una presión de contacto.

Durante las pruebas se midió el tiempo de la soldadura, este tiempo se tomó en cuenta desde el momento en que las piezas entran en contacto (Fase I de la soldadura), hasta detener el movimiento (Fase III de la soldadura), se midió también la longitud final de los materiales con lo cual se puede calcular el acortamiento del material, que representará el material expulsado debido al ablandamiento del material y la presión de contacto en la zona de soldadura.

Tabla 3.
Elementos y materiales para la construcción

PRUEBAS DE SOLDADURA						
Tamaño de los materiales	Información de la máquina	Parámetros de la soldadura				
Área de contacto (mm ²)	Presión Manómetro (MPa)	Fuerza de contacto (N)	Presión de contacto (MPa)	Tiempo de soldadura (s)	Acortamiento (mm)	Soldadura
207.00	0.80	226.82	1.10	8	0.36	No
87.42	1.20	340.24	3.89	8	0.82	Si
48.59	1.00	283.53	5.84	8	0.80	Si
49.42	1.50	425.30	8.61	8	1.34	Si
64.44	0.80	226.82	3.52	9	0.96	Si
64.32	1.20	340.24	5.29	9	1.26	Si
80.97	2.50	711.33	8.78	9	2.44	Si
77.19	1.20	342.64	4.44	10	0.70	Si
66.60	1.50	425.30	6.39	10	0.92	Si
60.00	1.50	425.30	7.09	10	1.38	Si
48.59	0.50	141.77	2.92	11	0.58	Si
65.40	1.00	283.53	4.34	11	1.06	Si
48.34	1.00	283.53	5.87	11	1.72	Si
85.86	2.00	567.06	6.60	11	1.72	Si
207.00	1.00	283.53	1.37	12	0.40	Si
87.42	0.50	141.77	1.62	12	0.62	Si
67.26	1.80	510.35	7.59	12	1.76	Si
207.00	0.50	141.77	0.68	13	0.28	No
76.26	0.80	226.82	2.97	13	1.74	Si
76.88	0.50	141.77	1.84	13	0.70	Si
207.00	2.00	567.06	2.74	15	0.80	Si
48.59	0.50	142.27	2.93	15	0.76	Si
48.59	0.50	141.77	2.92	15	0.76	Si

Se realizó un gráfico de puntos dispersos que relaciona la presión de contacto y el acortamiento de los materiales también con tiempos de soldadura diferentes para comprender sus efectos (figura 18), recordando que se mantiene constante la frecuencia y amplitud de la vibración, en donde se observa que mientras más presión de contacto

se aplique a una soldadura se obtiene más acortamiento de material, por este motivo observamos que las funciones aproximadas que relacionan los datos son crecientes, de igual manera se observa que al realizar una soldadura que dure más tiempo también los materiales sufren mayor acortamiento.

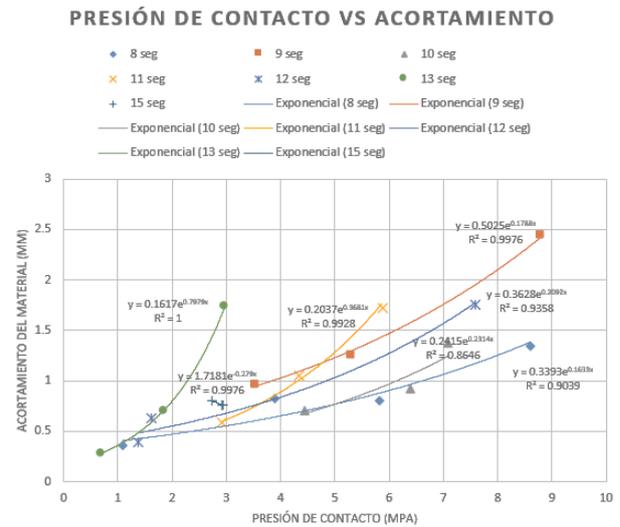


Figura 18: Gráfico de la presión de soldadura vs acortamiento del material.

Durante las pruebas se tuvieron pocas soldaduras sin éxito debido a que no se utilizó la suficiente presión de contacto ni el tiempo suficiente para consolidar la unión.

4.1.2. Resistencia de la soldadura

Una vez que se verificó que se pueden realizar soldaduras exitosas con el prototipo de máquina de soldadura por fricción lineal de acrílicos, se debe probar la calidad de soldadura que se puede realizar con ella. Para ello se realizaron pruebas de tracción y de impacto, no se realizaron pruebas de flexión debido a que los equipos con los que se contaban no tienen la suficiente sensibilidad para registrar los datos. Éstas pruebas se realizaron con el objetivo de comparar la resistencia que tiene la soldadura por fricción lineal en comparación al material base y a otro método de unión distinto que comúnmente se utiliza en la industria decorativa nacional.

La norma para el ensayo de tracción utilizado fue “NTE INEN ISO 527-1.- Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales (ISO 527-1:2012, IDT)”, en donde se evidencia que el promedio de la fuerza máxima a tracción que soporta el material base de acrílico fue de 290,00 N, el promedio del esfuerzo presente aquí fue de 274,28 MPa, el módulo de elasticidad fue de 220,805 MPa, la deformación fue del 12%. En comparación a los resultados de las probetas soldadas por fricción que tuvieron un valor de 275,00 N para el promedio de fuerza máxima, 26,584 MPa para el promedio del esfuerzo, el módulo de elasticidad fue de 188,878 MPa y el porcentaje de elongación fue del 14%.

Por tanto, se puede decir que las propiedades mecánicas en la zona soldada, obtenidas en este ensayo, son similares a las propiedades del material base de acrílico, siendo 5,17% menores, esto además se puede comprobar al observar las probetas rotas que se encuentran en las tablas mencionadas anteriormente. Donde la rotura de las probetas soldadas por fricción ocurrió en la zona de unión a excepción de una de ellas, demostrando que la soldadura por fricción es casi igual de resistente que el material base a soldar, para esfuerzo aplicado a tracción.

Para este ensayo de impacto Charpy, se realizaron 3 probetas para cada tipo de unión, es decir, 3 probetas de material base, 3 probetas unidas por fricción lineal y 3 para la unión con pegamento a base de cianoacrilato. Para ellos se recurrió a la norma “NTE INEN ISO 179-2:2014 Plásticos. Determinación de las propiedades frente al Impacto Charpy. Parte 2: Ensayo de impacto instrumentado”, que indica las dimensiones de las probetas de acrílico para poder realizar los ensayos y estas medidas fueron de (80x10x4) mm, de igual manera que en las probetas de tracción, las probetas para el ensayo de impacto Charpy se obtuvieron cortándolas en láser para obtener medidas más precisas.

Se evidencia que las probetas de material base de acrílico (sin ningún tipo de unión), son las más resistentes al impacto (0,810 J), en comparación a los otros tipos de probetas, de entre ellas las probetas unidas con pegamento son las menos resistentes, (0,098 J) para la soldadura por fricción lineal y (0,078 J) para la unión por pegamento.

4.2. Discusión

En esta parte se analizan los resultados de la presente investigación con el fin de justificar el aporte que tiene el proyecto.

El prototipo de máquina de soldadura por fricción lineal de acrílico, sí permitió realizar la unión de materiales de acrílico mediante este tipo de soldadura, esto se logró investigando las características que tienen las máquinas del mismo tipo presentes en el mercado internacional y el prototipo obtenido tiene las mismas características, pero más simplificadas, se investigó las propiedades mecánicas y térmicas del Polimetilmetacrilato (Acrílico), para realizar simulaciones por el Método del elemento finito y determinar los parámetros y magnitudes que debe cumplir la máquina, luego se realizó la selección del mecanismo adecuado para el funcionamiento que fue el mecanismo de biela-manivela-corredera, se seleccionaron los componentes que se pueden obtener en el mercado nacional, luego se diseñaron y fabricaron los elementos complementarios que conforman la máquina, luego se realizó el ensamblado y pruebas de funcionamiento, una vez obtenido el prototipo se procedió a realizar pruebas de soldadura para recopilar los datos y obtener los parámetros y magnitudes que son adecuados para poder obtener una buena unión de materiales de acrílico.

En las pruebas realizadas se llegó a determinar que en la soldadura por fricción con este prototipo de máquina se la puede obtener en un amplio rango de presiones, donde solamente se puede indicar que el valor mínimo de presión de contacto es de

1,32 MPa aproximadamente y que el tiempo de soldadura debe ser igual o superior a 9 segundos. Valores menores a los indicados no garantizan el éxito en la soldadura.

La resistencia mecánica a tracción que se obtuvieron en las probetas soldadas por fricción lineal es 5,17% menor que las probetas de material sin soldar, por lo que se puede decir que la resistencia a tracción de la zona de soldadura es similar a la del material base. En cuanto a la resistencia al impacto la soldadura por fricción es muy inferior a la resistencia de las probetas de material base llegando a alcanzar el 12% de la resistencia al impacto de las probetas sin soldar, pero si es superior al otro método de unión con pegamento.

Por tanto, se puede decir que la soldadura por fricción lineales adecuado para unir materiales a base de acrílico que deben resistir esfuerzos a tracción o compresión teniendo una resistencia aproximada a la del material base y no se recomienda usarla si los elementos a unir están sometidos a impactos.

5. CONCLUSIONES

Mediante el diseño y construcción planteados en la presente investigación se pudo obtener un prototipo de máquina de soldadura por fricción lineal, donde se comprobó que sí se puede realizar este tipo de soldadura de manera eficiente mediante la aplicación de los parámetros adecuados para el acrílico.

La temperatura de vitrificación del acrílico se encuentra entre (85 a 165) °C aproximadamente, además su coeficiente de fricción que varía entre 0.25 y 0.8, estos valores varían dependiendo del envejecimiento del termoplástico y de la relación entre la presión de contacto con el módulo de elasticidad del acrílico, aunque el valor del coeficiente que se usó en el presente trabajo fue de 0.5 debido a que la gráfica del coeficiente de

fricción versus presión de contacto tiende a este valor. Estas propiedades fueron necesarias para poder realizar las simulaciones mediante software CAE y poder determinar los parámetros y magnitudes que se requieren para soldar acrílico mediante soldadura por fricción lineal.

En el diseño del prototipo se pudo determinar la carga máxima que se puede aplicar en la máquina para poder realizar uniones de soldadura por fricción, ese valor debe ser inferior a 900N para que los componentes del mecanismo de la máquina no fallen por deformación plástica y tengan un coeficiente de seguridad mínimo de 2.

La máquina que se llegó construir tiene las siguientes características: frecuencia de vibración 100 Hz (fija), amplitud de vibración de 4mm (fija), tiene incorporado un manómetro indicador de presión hidráulica de 0 a 3 bar (0 a 30 MPa) y un sistema de frenado mediante zapata de fricción.

La resistencia a la tracción que se obtiene en la zona de soldadura es similar a la del mismo acrílico, siendo solamente 5,17% inferior en esta característica, la resistencia al impacto que ofrece este tipo de soldadura es en cambio muy inferior, llegando a tener solamente el 12% de la resistencia al impacto del acrílico, esto puede deberse a las fisuras que se forman en la zona del material expulsado como consecuencia del material blando a la temperatura de vitrificación del material y la presión que hay entre las superficies a unir. Por tanto, se puede decir que la soldadura que ofrece la máquina del presente proyecto es idónea para aplicaciones donde los materiales unidos estén sometidos a esfuerzos de tracción o compresión.

6. REFERENCIAS

- [1] P. A. Tres, *Designing Plastic Parts for Assembly*, Múnich, Alemania: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017.
- [2] R. Rudrapati, "Effects of welding process conditions on friction stir welding of polymer

- composites: A review," *Composites Part C: Open Access*, vol. 8, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100269>.
- [3] S. Eslami, "New Technological Solution for Friction Stir Welding of Composites," *Procedia Structural Integrity*, vol. 28, pp. 659-666, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.076>.
- [4] Y. Huang, "New technique of friction-based filling stacking joining for metal and polymer," *Composites Part B: Engineering*, vol. 163, pp. 217-223, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.050>.
- [5] M. P. S. P. Asadi, "Friction stir welding/processing of polymeric materials," *Advances in Friction-Stir Welding and Processing*, pp. 601-670, 2014, <https://doi.org/10.1533/9780857094551.601>.
- [6] N. Ranjan, "Joining of Thermoplastics With Friction Stir Welding for Minor Repair," *Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers*, vol. 1, pp. 212-219, 2022, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00015-8>.
- [7] M. T. Shete, "Experimental investigation and finite element simulation of friction stir spot welding (FSSW) of high-density polyethylene joints," *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, p. 47, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.572>.
- [8] T. B. R. K. Saxena, "Analysis of joint overlap during friction spin welding of plastics," *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 2798-2804, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.581>.
- [9] R. S. R. Kumar, "Friction welding of dissimilar plastic/polymer materials with metal powder reinforcement for engineering applications," *Composites Part B: Engineering*, vol. 101, pp. 77-86, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.082>.
- [10] C. F. F. Moroni, "Life cycle analysis of engineering polymer joining methods using adhesive bonding: fatigue performance and environmental implications," *The 29th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, vol. 105, pp. 565-570, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.094>.
- [11] H. Alojaly, "Joining of Plastics and Polymeric Materials," *Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers*, vol. 3, pp. 317-337, 2022, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00035-3>.
- [12] M. Troughton, *Handbook of Plastics Joining: A Practical Guide*, ELSEVIER, 2008.
- [13] B. Patham, "Thermoplastic Vibration Welding: Review of Process," *Polymer Engineering and Science*, vol. 51, pp. 1-22, 2011, <https://doi.org/10.1002/pen.21784>.
- [14] W. Li, "Modeling of continuous drive friction welding of mild steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, pp. 5921-5926, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.001>.