



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA DE SOLDADURA POR FRICCIÓN LINEAL DE ACRÍLICO**

**RODRIGO PATRICIO TOASA JIMENES**

Trabajo de Titulación modalidad de Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGÍSTER EN DISEÑO MECÁNICO**

Riobamba – Ecuador

Julio 2021

© 2021, **Rodrigo Patricio Toasa Jimenes**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

## CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, titulado DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA DE SOLDADURA POR FRICCIÓN LINEAL DE ACRÍLICO, de responsabilidad del Ing. Rodrigo Patricio Toasa Jimenes ha sido minuciosamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Ing. Luis Eduardo Hidalgo Almeida; PhD  
**PRESIDENTE**

Firmado digitalmente por LUIS  
EDUARDO HIDALGO ALMEIDA  
Nombre de reconocimiento (DN): c=EC,  
o=BANCO CENTRAL DEL ECUADOR,  
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE  
INFORMACION-ECIBCE, l=QUITO,  
serialNumber=0000445780, cn=LUIS  
EDUARDO HIDALGO ALMEIDA  
Fecha: 2021.07.29 08:32:36 -05'00'

---

Ing. Sócrates Miguel Aquino Arroba; Mag  
**DIRECTOR**



Firmado electrónicamente por:  
**SOCRATES MIGUEL  
AQUINO ARROBA**

---

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes; Mag  
**MIEMBRO**

Firmado digitalmente  
por JORGE ISAIAS  
CAICEDO REYES  
Fecha: 2021.07.27  
19:29:00 -05'00'

---



Firmado electrónicamente por:  
**MIGUEL ANGEL  
ESCOBAR  
GUACHAMBALA**

---

Ing. Miguel Ángel Escobar Guachambala; Mag  
**MIEMBRO**

Riobamba, julio de 2021

## DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Rodrigo Patricio Toasa Jimenes, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



---

ING. RODRIGO PATRICIO TOASA JIMENES

No. CÉDULA 1804375291

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Hernán Toasa y Rosa Jimenes quienes me han dado todo su apoyo y amor incondicional en todos los momentos de mi vida, han sabido ser guías y ejemplos a seguir, brindando a mis hermanos y a mí, la oportunidad de ser profesionales y sobretodo personas de bien. A mis hermanos Alex y Hernán que supieron motivarme y apoyarme a seguir a adelante en los momentos más complicados y a mi esposa Clara Paredes por su amor y tolerancia infinita desde el momento que unimos nuestras vidas.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por haberme dado la sabiduría y la fortaleza que me ha ayudado llegar a ser el profesional que soy.

A todos los docentes del programa de maestría quienes han compartido sus conocimientos y experiencias durante mi proceso de formación, especialmente al Ing. Miguel Aquino por ayudarme durante el desarrollo del presente proyecto como mi tutor.

Al Ing. Isaías Caicedo e Ing. Miguel Escobar quienes me han guiado como asesores para poder cumplir con el propósito de mi trabajo de titulación.

Rodrigo

## TABLA CONTENIDO

RESUMEN .....	XVIII
SUMMARY .....	XIX

### CAPÍTULO I

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Planteamiento del problema.....	1
1.1.1	<i>Situación problemática</i> .....	1
1.1.2	<i>Formulación del problema</i> .....	2
1.1.3	<i>Preguntas directrices o específicas de la investigación</i> .....	2
1.1.4	<i>Justificación de la investigación</i> .....	2
1.1.5	<i>Objetivo general de la investigación</i> .....	3
1.1.6	<i>Objetivos específicos de la investigación</i> .....	3
1.1.7	<i>Hipótesis</i> .....	3
1.1.7.1	<i>Hipótesis General</i> .....	3

### CAPÍTULO II

2	MARCO TEÓRICO .....	4
2.1	Antecedentes del problema.....	4
2.2	Bases teóricas .....	6
2.2.1	<i>Introducción a la unión de plásticos</i> .....	6
2.2.2	<i>Soldadura por fricción</i> .....	7
2.2.3	<i>Ventajas y limitaciones de la soldadura por fricción</i> .....	8
2.2.3.1	<i>Ventajas</i> .....	9
2.2.3.2	<i>Desventajas</i> .....	9
2.2.4	<i>Parámetros y fases en la soldadura por fricción</i> .....	9
2.2.5	<i>Tipos de soldadura por fricción</i> .....	11
2.2.6	<i>Soldadura por fricción rotacional</i> .....	12
2.2.7	<i>Soldadura por fricción orbital</i> .....	14
2.2.8	<i>Soldadura por fricción angular</i> .....	16
2.2.9	<i>Soldadura por fricción-agitación</i> .....	16
2.2.10	<i>Soldadura por fricción lineal (Vibration welding)</i> .....	18
2.2.10.1	<i>Ventajas y desventajas de la soldadura por fricción lineal</i> .....	20

2.2.10.2	<i>Materiales que se pueden soldar</i> .....	21
2.2.10.3	<i>Equipo de soldadura por fricción lineal</i> .....	22
2.2.11	<i>Parámetros de soldadura por fricción lineal</i> .....	25
2.2.12	<i>Modelo de contacto, generación de calor y calor de entrada</i> .....	29
2.2.13	<i>Polimetilmetacrilato PMMA (Acrílico)</i> .....	30

## CAPÍTULO III

<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>34</b>
<b>3.1</b>	<b>Identificación de variables</b> .....	<b>34</b>
3.1.1	<i>Variable independiente</i> .....	34
3.1.2	<i>Variable dependiente</i> .....	34
3.1.3	<i>Variable interviniente</i> .....	34
<b>3.2</b>	<b>Operacionalización de las variables</b> .....	<b>34</b>
<b>3.3</b>	<b>Matriz de consistencia</b> .....	<b>36</b>
<b>3.4</b>	<b>Metodología de la investigación</b> .....	<b>38</b>
3.4.1	<i>Tipo y diseño de la investigación</i> .....	38
3.4.2	<i>Métodos de investigación</i> .....	39
3.4.3	<i>Enfoque de la investigación:</i> .....	39
3.4.4	<i>Alcance de la investigación:</i> .....	39
3.4.5	<i>Población de estudio:</i> .....	39
3.4.6	<i>Unidad de análisis:</i> .....	39
3.4.7	<i>Selección de muestra</i> .....	39
3.4.8	<i>Tamaño de la muestra</i> .....	39
3.4.9	<i>Técnica de recolección de datos primarios y secundarios</i> .....	40
3.4.10	<i>Instrumentos para procesar datos recopilados</i> .....	40
<b>3.5</b>	<b>Diseño y construcción del prototipo de máquina para soldadura por fricción lineal de acrílico.</b> .....	<b>40</b>
3.5.1	<i>Introducción</i> .....	40
3.5.2	<i>Características de la máquina</i> .....	41
3.5.3	<i>Parámetros de la máquina para la soldadura de termoplásticos</i> .....	43
3.5.4	<i>Simulación y selección de parámetros de soldadura para el acrílico (Polimetilmetacrilato PMMA)</i> .....	44
3.5.5	<i>Selección del mecanismo de la mesa vibradora</i> .....	54
3.5.5.1	<i>Mecanismo de biela-manivela-corredera</i> .....	54
3.5.5.2	<i>Leva circular excéntrica con seguidor de cara plana</i> .....	56
3.5.6	<i>Análisis cinemático de los mecanismos</i> .....	58



3.5.7	<i>Análisis Dinámico</i> .....	65
3.5.8	<i>Evaluación y selección del mecanismo</i> .....	68
3.5.9	<i>Modelado y ensamble CAD del prototipo</i> .....	69
3.5.10	<i>Selección de elementos principales</i> .....	70
3.5.10.1	<i>Selección del motor</i> .....	70
3.5.10.2	<i>Corredera de la mesa vibradora</i> .....	72
3.5.10.3	<i>Sistema de frenado</i> .....	74
3.5.11	<i>Análisis cinético y dinámico – Determinación del torque requerido</i> .....	76
3.5.12	<i>Determinación de esfuerzos (Análisis por el Método de Elementos Finitos)</i> .....	80
3.5.12.1	<i>Acople excéntrico (Funcionamiento en vacío)</i> .....	81
3.5.12.2	<i>Biela (Funcionamiento en vacío)</i> .....	84
3.5.12.3	<i>Riel-Pasador (Funcionamiento en vacío)</i> .....	87
3.5.12.4	<i>Acople (Funcionamiento con carga máxima permitida)</i> .....	90
3.5.12.5	<i>Biela (Funcionamiento con carga máxima permitida)</i> .....	92
3.5.12.6	<i>Riel-Pasador (Funcionamiento con carga máxima permitida)</i> .....	94
3.5.12.7	<i>Mesa de la máquina (Análisis Modal)</i> .....	97
3.5.13	<i>Construcción del prototipo de máquina para soldadura por fricción lineal de acrílico</i> .....	101
3.5.13.1	<i>Materiales para la construcción</i> .....	101
3.5.13.2	<i>Construcción mecánica de la máquina</i> .....	102

## CAPÍTULO IV

4	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	109
4.1	<b>Resultados</b> .....	109
4.1.1	<i>Parámetros de soldadura</i> .....	109
4.1.2	<i>Control de la soldadura</i> .....	113
4.1.3	<i>Resistencia de la soldadura</i> .....	116
4.1.3.1	<i>Ensayo de tracción</i> .....	116
4.1.3.2	<i>Ensayo de impacto</i> .....	122
4.2	<b>Comprobación de la hipótesis</b> .....	128
4.3	<b>Discusión</b> .....	129

## CAPÍTULO V

5	<b>PROPUESTA</b> .....	130
5.1	<b>Introducción</b> .....	130

<b>5.2</b>	<b>Dimensiones.....</b>	<b>130</b>
<b>5.3</b>	<b>Proceso de manufactura .....</b>	<b>131</b>
<b>5.4</b>	<b>Costos de construcción .....</b>	<b>132</b>
<b>5.5</b>	<b>Aplicación .....</b>	<b>133</b>
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>136</b>
	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>137</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2.</b> Parámetros en el proceso de soldadura por fricción .....	9
<b>Tabla 2-2.</b> Resistencia al Impacto de Lámina de PMMA comparada con la de Vidrio de diferentes tipos.....	31
<b>Tabla 3-2.</b> Pesos de láminas de láminas de acrílico en relación con su espesor.....	31
<b>Tabla 1-3.</b> Tabla de operacionalización de las variables.....	35
<b>Tabla 2-3.</b> Tabla de matriz de consistencia.....	36
<b>Tabla 3-3.</b> Tabla morfológica del concepto de la máquina .....	42
<b>Tabla 4-3.</b> Parámetros de funcionamiento de las máquinas de soldadura por fricción lineal. ..	44
<b>Tabla 5-3.</b> Parámetros de soldadura.....	50
<b>Tabla 6-3.</b> Matriz de decisión del método PUGH.....	68
<b>Tabla 7-3.</b> Material usado en el acople excéntrico.....	81
<b>Tabla 8-3.</b> Fuerzas y momentos presentes en el acople excéntrico para el mecanismo sin carga .....	81
<b>Tabla 9-3.</b> Propiedades mecánicas del elemento de la biela .....	84
<b>Tabla 10-3.</b> Cargas aplicadas a la biela .....	85
<b>Tabla 11-3.</b> Materiales del ensamble Riel y pasador .....	87
<b>Tabla 12-3.</b> Fuerzas aplicadas al ensamble del riel y pasador.....	88
<b>Tabla 13-3.</b> Valores de carga presentes en el acople aplicada una carga de 900N en el riel .....	91
<b>Tabla 14-3.</b> Fuerzas presentes en la biela con una carga aplicada en el riel.....	93
<b>Tabla 15-3.</b> Fuerzas presentes en el ensamble del riel y el pasador cuando se aplica una carga de 900 N en el riel.....	94
<b>Tabla 16-3.</b> Características del material .....	98
<b>Tabla 17-3.</b> Configuración de la malla de la mesa estructural .....	100
<b>Tabla 18-3.</b> Resultados de frecuencias naturales de la estructura de la máquina. ....	100
<b>Tabla 19-3.</b> Materiales usados en la construcción de la máquina de soldadura por fricción lineal. ....	101
<b>Tabla 20-3.</b> Registro de datos para la calibración de la gata hidráulica. ....	104
<b>Tabla 1-4.</b> Magnitudes medidas en las pruebas de soldadura por fricción lineal. ....	111
<b>Tabla 2-4.</b> Datos obtenidos de los ensayos a tracción de las probetas unidas por soldadura por fricción lineal.....	120
<b>Tabla 3-4.</b> Resultados de los ensayos a tracción de las probetas de materia base de acrílico. ....	121
<b>Tabla 4-4.</b> Datos del ensayo de impacto.....	123
<b>Tabla 5-4.</b> Resultados de los ensayos en las probetas de material base de acrílico. ....	125
<b>Tabla 6-4.</b> Resultados de los ensayos en las probetas de acrílico unidas por fricción lineal. ....	126

<b>Tabla 7-4.</b> Resultados de los ensayos en las probetas unidas mediante pegamento. ....	127
<b>Tabla 1-5.</b> Procesos de manufactura de la máquina de soldadura por fricción lineal de acrílico. .....	131
<b>Tabla 2-5.</b> Tabla de costos en el proceso de construcción. ....	132

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2.</b>	Técnicas principales para la unión de plásticos.....	6
<b>Figura 2-2.</b>	Proceso de soldadura por fricción simplificado .....	8
<b>Figura 3-2.</b>	Fusión típica en función del tiempo para la soldadura por fricción.....	10
<b>Figura 4-2.</b>	Tipos de soldadura por fricción .....	11
<b>Figura 5-2.</b>	El proceso de soldadura por rotación: (a) las piezas se cargan en el accesorio inferior; (b) el cabezal impulsor comienza a girar y desciende para engancharse con la parte superior; (c) se realiza la soldadura, se detiene la rotación y el conjunto se enfría bajo presión; (d) los elevadores del cabezal impulsor y la pieza soldada se retira. ....	13
<b>Figura 6-2.</b>	Máquina para soldadura por fricción rotacional.....	14
<b>Figura 7-2.</b>	Descripción de la soldadura por fricción orbital .....	15
<b>Figura 8-2.</b>	Descripción de una máquina de soldadura por fricción orbital .....	15
<b>Figura 9-2.</b>	Descripción por soldadura angular .....	16
<b>Figura 10-2.</b>	Proceso de soldadura por fricción agitación .....	17
<b>Figura 11-2.</b>	Sistema de zapata caliente para FSW de termoplásticos. ....	18
<b>Figura 12-2.</b>	Soldadura por fricción lineal.....	19
<b>Figura 13-2.</b>	Una máquina de soldadura por fricción lineal típica.....	23
<b>Figura 14-2.</b>	Esquema de una máquina de soldadura por fricción lineal .....	24
<b>Figura 15-2.</b>	Representación del tiempo de soldadura en función de (a) frecuencia de oscilación (f); (b) amplitud de oscilación (a); (c) presión de fricción (P); y (d) acortamiento axial (s). Los marcadores abiertos y llenos denotan las condiciones no soldadas (con óxidos o huecos en la interfaz de la unión) y soldadas, respectivamente. ....	27
<b>Figura 16-2.</b>	Gráfico de la dependencia del tiempo de soldadura de la entrada de potencia para varios valores de acortamiento axial.....	28
<b>Figura 17-2.</b>	Comparación de las propiedades de fricción de una superficie recién creada con las de la misma superficie envejecida y rejuvenecida térmicamente. ....	33
<b>Figura 1-3.</b>	Aplicaciones del acrílico.....	40
<b>Figura 2-3.</b>	Proceso de diseño y construcción de la máquina .....	41
<b>Figura 3-3.</b>	Propiedades mecánicas y térmicas del PMMA .....	45
<b>Figura 4-3.</b>	Placa inferior de acrílico con mallado de elementos triangulares.....	46
<b>Figura 5-3.</b>	Forma de aplicación de la presión durante las simulaciones en el software CAE	47
<b>Figura 6-3.</b>	Pieza móvil de acrílico.....	47

<b>Figura 7-3.</b>	Comportamiento del movimiento en la soldadura por fricción lineal .....	48
<b>Figura 8-3.</b>	Ensamblaje y mallado de los elementos en el software CAE (Arriba). Ensamblaje y restricciones de los elementos en el software CAE (Abajo) .....	49
<b>Figura 9-3.</b>	Resultados de temperatura en los elementos del mallado de placas de 2 mm de espesor en simulación con software CAE de elementos finitos. ....	51
<b>Figura 10-3.</b>	Resultados de temperatura en los elementos del mallado de placas de 5 mm de espesor en simulación con software CAE de elementos finitos. ....	52
<b>Figura 11-3.</b>	Resultados de temperatura en los elementos del mallado de placas de 10 mm de espesor en simulación con software CAE de elementos finitos. ....	53
<b>Figura 12-3.</b>	Diagrama cinemático del mecanismo biela-manivela-corredera .....	55
<b>Figura 13-3.</b>	Variación de biela-manivela-corredera .....	56
<b>Figura 14-3.</b>	Leva de ancho constante .....	57
<b>Figura 15-3.</b>	Modelo de leva excéntrica .....	58
<b>Figura 16-3.</b>	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. ....	59
<b>Figura 17-3.</b>	Vista de corte del mecanismo simplificado de biela manivela (Arriba). Dimensiones del mecanismo (abajo). ....	60
<b>Figura 18-3.</b>	Resultados del análisis de posición, velocidad y aceleración. ....	61
<b>Figura 19-3.</b>	Mecanismo leva circular excéntrica. 1) Estructura base, 2) Eje, 3) Leva, 4) Deslizador, 5) Mesa acoplada a un seguidor, 6) Rieles. ....	62
<b>Figura 20-3.</b>	Vista de corte del mecanismo de leva circular excéntrica (Arriba). Medias principales del mecanismo (Abajo). ....	63
<b>Figura 21-3.</b>	Desplazamiento, velocidad y aceleración del mecanismo de leva circular excéntrica. ....	64
<b>Figura 22-3.</b>	Gráfico de torque del mecanismo biela manivela .....	66
<b>Figura 23-3.</b>	Gráfico de torque del mecanismo leva circular excéntrico .....	67
<b>Figura 24-3.</b>	Ensamble de la máquina de soldadura por fricción lineal en el ambiente de Inventor .....	70
<b>Figura 25-3.</b>	Amoladora D28499X .....	71
<b>Figura 26-3.</b>	Sujeciones del motor .....	72
<b>Figura 27-3.</b>	Catálogo HIWIN .....	73
<b>Figura 28-3.</b>	Construcción de la serie HG .....	74
<b>Figura 29-3.</b>	Bomba maestra KIMISSq1a9fggnrd-01 .....	75
<b>Figura 30-3.</b>	Cilindro esclavo de embrague 25183025 para Chevrolet Aveo 2006 .....	75
<b>Figura 31-3.</b>	Manguera hidráulica de freno o embrague para motocicleta marca Kweiny .....	76
<b>Figura 32-3.</b>	Mecanismo Biela-Manivela-Corredera .....	76

<b>Figura 33-3.</b> Mecanismo en el ambiente de simulación dinámica. ....	77
<b>Figura 34-3.</b> Gráfico de posición, velocidad y aceleración del mecanismo. ....	78
<b>Figura 35-3.</b> Gráfico del torque requerido del motor sin carga. ....	79
<b>Figura 36-3.</b> Torque requerido del motor para una carga de 6000 N. ....	80
<b>Figura 37-3.</b> Tasa de convergencia en el análisis del acople excéntrico. ....	82
<b>Figura 38-3.</b> Resultado de esfuerzos equivalente de Von Mises. ....	83
<b>Figura 39-3.</b> Coeficiente de fricción del acople excéntrico sin carga en el mecanismo. ....	84
<b>Figura 40-3.</b> Esfuerzos presentes en la biela sin carga aplicada al mecanismo. ....	86
<b>Figura 41-3.</b> Convergencia de la simulación de esfuerzos de la biela sin carga aplicada en el mecanismo. ....	86
<b>Figura 42-3.</b> Resultados del coeficiente de seguridad en la biela en funcionamiento en vacío. ....	87
<b>Figura 43-3.</b> Esfueros de Von Misses en el ensamble Riel-Pasador. ....	89
<b>Figura 44-3.</b> Tasa de convergencia del riel pasador. ....	89
<b>Figura 45-3.</b> Coeficiente de seguridad del riel pasador sin carga en el mecanismo. ....	90
<b>Figura 46-3.</b> Esfuerzo de Von Mises en el acople con carga aplicada en el riel. ....	91
<b>Figura 47-3.</b> Coeficiente de seguridad del acople con carga aplicada en el acople. ....	92
<b>Figura 48-3.</b> Esfuerzo de Von Mises en la biela con carga aplicada en el riel del mecanismo. ....	93
<b>Figura 49-3.</b> Coeficiente de seguridad en la biela con carga aplicada en el riel del mecanismo. .....	94
<b>Figura 50-3.</b> Ubicación de las fuerzas en el ensamble riel-pasador. a) Carga de rodamiento, b) Fuerza 1, c) Fuerza 2. ....	95
<b>Figura 51-3.</b> Esfuerzo de Von Mises en el ensamble del riel y pasador. ....	96
<b>Figura 52-3.</b> Coeficiente de seguridad en el ensamble riel-pasador durante una carga de 900N sobre el riel del mecanismo. ....	97
<b>Figura 53-3.</b> Mesa estructural de la máquina. ....	98
<b>Figura 54-3.</b> Restricciones del modelo. ....	99
<b>Figura 55-3.</b> Mallado de la estructura de la mesa. ....	99
<b>Figura 56-3.</b> Primer modo de falla debido a la primera frecuencia natural. ....	101
<b>Figura 57-3.</b> Mesa estructural de la máquina. Arriba: Vista superior. Abajo: Vista lateral derecha. ....	102
<b>Figura 58-3.</b> Ensamble del mecanismo a la mesa estructural. ....	103
<b>Figura 59-3.</b> Ensamble del sistema de presión y sujeción. ....	104
<b>Figura 60-3.</b> Gráfico presión vs fuerza de la gata hidráulica para la calibración. ....	105
<b>Figura 61-3.</b> Ensamble del sistema de presión y sujeción. ....	105
<b>Figura 62-3.</b> Elementos del sistema de frenado. ....	106
<b>Figura 63-3.</b> Esquema eléctrico de conexión. ....	107
<b>Figura 64-3.</b> Prototipo de máquina de soldadura por fricción lineal de acrílico. ....	107

<b>Figura 65-3.</b>	Forma de soldadura que se puede obtener con el prototipo de la máquina de la soldadura por fricción lineal. ....	108
<b>Figura 1-4.</b>	Resultado de la soldadura. ....	109
<b>Figura 2-4.</b>	Gráfico de la presión de contacto vs acortamiento del material. ....	113
<b>Figura 3-4.</b>	Obtención de soldadura con presión de contacto de 7Mpa y tiempo de soldadura de 9 seg. ....	114
<b>Figura 4-4.</b>	Chaflanado de la placa de acrílico a soldar para controlar el acortamiento en la soldadura. ....	115
<b>Figura 5-4.</b>	Acabado de soldadura con control de acortamiento mediante un chaflanado de 1mm x 1mm. ....	115
<b>Figura 6-4.</b>	Dimensiones para las probetas de ensayo a tracción. ....	117
<b>Figura 7-4.</b>	Forma de soldadura para obtener las probetas. ....	118
<b>Figura 8-4.</b>	Probetas para las pruebas. ....	118
<b>Figura 9-4.</b>	Probetas para el ensayo a impacto. ....	123
<b>Figura 10-4.</b>	Probeta de impacto donde se observa la zona de soldadura. ....	128
<b>Figura 1-5.</b>	Aplicaciones del acrílico. ....	130
<b>Figura 2-5.</b>	Dimensiones en milímetros de la máquina construida. ....	131
<b>Figura 3-5.</b>	Habladores de acrílico usados en la publicidad. Izquierda: Frontal del hablador. Derecha: Vista posterior del hablador. ....	134
<b>Figura 4-5.</b>	Aplicación de la soldadura por fricción lineal en un hablador de acrílico. ....	135



## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** PLANOS DEL PROTOTIPO DE MÁQUINA.

**ANEXO B:** RESULTADOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN E IMPACTO.

**ANEXO C:** ESPECIFICACIONES DE LOS DESLIZADORES HG15.

**ANEXO D:** MANUAL DE INSTRUCCIONES Y MANTENIMIENTO DE LA MÁQUINA.

## RESUMEN

El objetivo principal fue diseñar y construir un prototipo de máquina de soldadura por fricción lineal para unir acrílico, dando a la industria nacional una mejor opción al momento de unir este material. La metodología, para el diseño se determinaron los parámetros de soldadura por poder realizar esta unión en el acrílico, que se las hizo mediante simulaciones por el método de elemento finito, se seleccionó el mecanismo más adecuado que se incorporó en 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 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 clave:** <FRICCIÓN LINEAL>, <SOLDADURA>, <PRESIÓN>, <ESFUERZOS>, <SIMULACIÓN>.

**LUIS  
ALBERTO  
CAMINOS  
VARGAS**

Firmado digitalmente por  
LUIS ALBERTO CAMINOS  
VARGAS  
Nombre de reconocimiento  
(DN): c=EC, l=RIOBAMBA,  
serialNumber=0002706974,  
cn=LUIS ALBERTO CAMINOS  
VARGAS  
Fecha: 2021.06.28 20:38:02  
-05'00'



0083-DBRAI-UPT-IPEC-2021

## SUMMARY

The main objective was to design and build a prototype of a linear friction stir welding machine to join acrylic, giving the national industry a better option when joining this material. The theoretical bases are reviewed in chapter two, where mainly friction welding is reviewed. The methodology, design and construction carried out to conceive the prototype of the welding machine are shown in chapter three, for the design, the welding parameters were determined to be able to perform this union in acrylic, which was done through simulations by the finite element method, the most appropriate mechanism was selected and incorporated in the machine. An optimized CAD model was made with which later stress analysis was performed on the elements of the mechanism, 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 the correct ones 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 must be applied. Tensile and impact strength tests were carried out on linear friction welded specimens and compared with whole, unwelded specimens. Where, it was determined that the tensile strength of the weld zone is 5% lower compared to the acrylic base material, but it barely reaches 12% of the impact strength of the base material. In chapter five the dimensions, characteristics, costs and applications that the obtained machine has are indicated.

**Keywords:** <LINEAR FRICTION>, <WELDING>, <PRESSURE>, <STRENGTHS>, <SIMULATION>.

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

#### 1.1.1 *Situación problemática*

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. (Viteri, P., 2016)

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. (Jerson, P. & Alexander, D., 2018)

En Latinoamérica, la soldadura por fricción recientemente se está investigando, existen investigaciones y artículos científicos sobre la soldadura por fricción rotativa y por fricción-agitación sobretodo en metales y muy poco en termoplásticos, además las máquinas en las que se realizó esta soldadura en las investigaciones, son máquinas herramientas convencionales modificadas o adaptadas para realizar esta acción, éstas máquinas usadas son tornos o fresadoras manuales; es decir, no hay máquinas construidas específicamente para realizar la soldadura por fricción.

En el Ecuador se está investigando la soldadura por fricción, mayormente para la rotativa y por fricción agitación, no existen aún investigaciones para la soldadura lineal, tampoco algún prototipo de máquina que pueda realizar esta unión de materiales. Por tanto, es necesario realizar estudios de un método diferente de unión de materiales con el fin de mejorar la fiabilidad en la soldabilidad de materiales y ser un aporte importante en el sector de la industria nacional

### ***1.1.2 Formulación del problema***

¿Cómo realizar el diseño y construcción de una máquina para soldadura de termoplásticos cómo el acrílico mediante la soldadura por fricción?

### ***1.1.3 Preguntas directrices o específicas de la investigación***

¿Qué es la soldadura por fricción lineal y cuáles son sus ventajas y desventajas?

¿Cuáles son los parámetros y magnitudes de funcionamiento para realizar la soldadura por fricción lineal en materiales de acrílico?

¿Qué mecanismos serán los adecuados para generar el movimiento y la soldadura en la máquina?

¿Cuál es la calidad de la soldadura que se obtendrá con ésta máquina?

### ***1.1.4 Justificación de la investigación.***

En esta investigación se pretende demostrar que se puede realizar la soldadura por fricción en materiales termoplásticos, mediante una máquina sencilla y barata en comparación a las ya existentes en mercados internacionales, dando a la industria nacional una alternativa eficaz para la unión de materiales termoplásticos para sus distintas aplicaciones.

En el diseño de la máquina se necesitará investigar sobre el material que se va a unir y magnitudes de funcionamiento para la soldadura por fricción lineal y sus relaciones con respecto a la calidad de soldadura que se obtendrá.

La contribución teórica para la investigación, es realizar un análisis sobre la relación de los parámetros de funcionamiento de la máquina para realizar la soldadura por fricción entre superficies en contacto y en movimiento, con la temperatura y el tiempo de duración del proceso que son de mucha importancia en la presente investigación.

El diseño y construcción de la máquina, es la contribución práctica, que determinará la calidad de soldadura entre los materiales, mediante ensayos de tracción, para determinar la resistencia que tendrá la soldadura con respecto del material base, por lo cual es importante determinar los parámetros adecuados que intervienen en el proceso, la selección de los mecanismos y condiciones que se deben llevar a cabo.

Con el desarrollo de la investigación, se beneficiaría la industria nacional, al tener una nueva opción al momento de realizar uniones de materiales para la fabricación de partes plásticas, dando una aplicación práctica de la fuerza de fricción para unir materiales, el cual será un aporte en la investigación en el campo de la soldadura que puede ser mejorada.

### ***1.1.5 Objetivo general de la investigación***

Diseñar y construir un prototipo de máquina, para realizar la unión de materiales termoplásticos como el acrílico mediante la soldadura por fricción lineal.

### ***1.1.6 Objetivos específicos de la investigación***

- Investigar sobre las propiedades principales del acrílico, que intervendrán durante el proceso de soldadura del mismo.
- Seleccionar y dimensionar los mecanismos que se aplicarán en el diseño de máquina.
- Determinar los parámetros de funcionamiento que se requerirá para realizar la soldadura por fricción lineal de materiales hechos en acrílico.
- Realizar la construcción de un prototipo inicial funcional y probar la calidad de la soldadura que puede realizar.

### ***1.1.7 Hipótesis***

#### ***1.1.7.1 Hipótesis General***

El diseño y la construcción de la máquina de soldadura por fricción lineal si permitirá unir materiales hechos en acrílico.

## CAPÍTULO II

### 2 MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes del problema

Existen trabajos de investigación referentes al presente tema, realizadas dentro y fuera del país, de las cuales se citará a continuación las principales que sirvieron de aporte a la presente investigación y los aspectos relevantes sobre el tema.

Los autores Suquillo Lema Alexander David y Paucar Pedraza Jerson Patricio (2018) del trabajo de investigación denominado: “SOLDABILIDAD Y ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN (FRW) Y LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW) EN LOS POLÍMEROS POLIAMIDA PA-66 Y POLIETILENO”, en sus conclusiones indican que dependiendo del polímero en el que se desea hacer la soldadura por fricción (FRW) y la soldadura por fricción-agitación (FSW) los parámetros de soldadura a controlar son pocos pero estos varían dependiendo del material, por ejemplo en la velocidad y tiempo de soldadura, determinaron que en la parte experimental de la soldadura por fricción (FRW) a bajas velocidades (rpm) en la poliamida PA-66 se genera una unión adecuada entre las probetas y no necesita mucho tiempo de calentamiento para llegar al punto de plastificación, mientras que para el polietileno de alta densidad tarda mucho más tiempo y se requiere altas velocidades (rpm), esto es debido a las propiedades de cada material. (ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Quito-Ecuador)

En la investigación “SOLDABILIDAD Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN EN ACRÍLICOS”, de los autores María José Lincango Gallegos y Pablo Andrés Viteri Erazo (2016), indican que este proceso de soldadura es óptimo para realizar la soldadura en acrílico pero no es viable para cualquier geometría del material, por lo que dependiendo de la forma que se tengan que unir los materiales se deben hacer modificaciones a las máquinas, también determinan que los parámetros de soldadura por fricción rotacional principales son la velocidad de rotación, presión de calentamiento y principalmente la presión de forja, ésta última es quien consolida la unión, también concluyen que estos parámetros están relaciones entre si dependiendo de la geometría del material y el tiempo de soldadura, al usar un material de mayor diámetro se requiere una velocidad mayor ya que se requiere de mayor energía calorífica para alcanzar la soldadura, la presión de calentamiento está estrechamente ligada a la velocidad con que se realiza el proceso de soldadura, a mayor velocidad, la presión de calentamiento necesaria para unir el material sin desgastarlo es menor, es decir la presión de calentamiento es inversamente proporcional a la velocidad, pero es directamente proporcional al

encogimiento, mayor presión de calentamiento genera mayor es el encogimiento, en otra de sus conclusiones determinan que la presión de calentamiento hace que el material alcance de 85°C a 95°C, que es menor a la temperatura de transición vítrea (110 °C) para que el material no llegue a ser totalmente líquido sino más bien pastoso y sufra una deformación sin cambiar sus propiedades. (ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Quito-Ecuador).

En la investigación “SOLDURA POR FRICCIÓN EN MATERIALES METÁLICOS Y POLÍMEROS” de los autores González León, J.A, Domínguez González, A. y Hernández Franco, R.A., indican que cada material tiene diferentes propiedades y por lo cual es necesario aplicar diferentes magnitudes en presión, tiempo y velocidad, por esto, es necesario conocer y manipular estos parámetros para asegurar una buena unión y repetitibilidad del proceso. Es posible la unión de los materiales metálicos por medio de soldadura por fricción, pero es necesario detectar los parámetros óptimos para que la unión sea satisfactoria. En los aceros, se necesita de velocidades altas que sobrepasen las 1000 rpm y tiempos cortos, ya que el acero alcanza temperaturas de estado plástico en poco tiempo; pero, se necesita de presiones altas para lograr la unión, lo que provoca desajustes en la maquinaria y hasta daños permanentes. En el aluminio, no es necesario aumentar en demasía la velocidad y la presión, basta con 700 rpm y 20 MPa para lograr una buena unión, pero los tiempos de unión aumentan, ya que el aluminio necesita de mayor tiempo para alcanzar su punto de estado plástico. (UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO, Santiago de Querétaro, México)

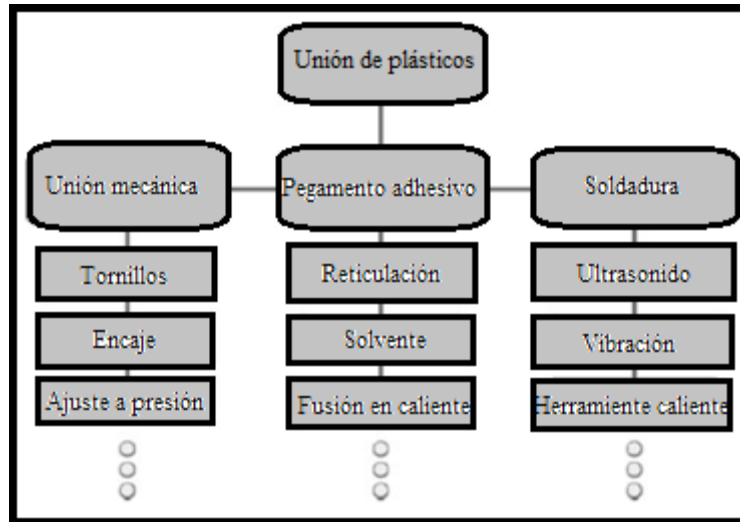
El autor Oscar Steven Millan Oliveros de la investigación “ANÁLISIS DE SOLDADURA EN PLACAS DE POLIPROPILENO UNIDAS MEDIANTE FRICCIÓN-AGITACIÓN PARA BANCOS DE TROQUELADO”, concluye que, de acuerdo a los resultados de tensión y a la observación microscópica, se demuestra que el control adecuado de los parámetros, como la velocidad de rotación, velocidad de avance y penetración de la herramienta es importante para obtener juntas con mejores propiedades; ya que estos parámetros permiten controlar la generación de calor y el reblandecimiento del material para así obtener una cohesión homogénea y obtener una unión resistente. También se evidenció que se requiere mayor agitación del material, por lo que se debería incrementar los rpm para lograr cohesión homogénea del material, de igual forma de acuerdo a los resultados de tensión se observa que las probetas trabajadas con menor velocidad de avance presentaron mejores propiedades mecánicas, debido a que se presenta mayor agitación del material. (Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali – Colombia).



## 2.2 Bases teóricas

### 2.2.1 Introducción a la unión de plásticos

A pesar de los objetivos de los diseñadores de moldear productos de un solo componente, hay muchos productos demasiado complejos para moldear como una sola pieza. Por lo tanto, el ensamblaje de subcomponentes es crítico para la fabricación de muchos productos. Los métodos para unir componentes plásticos se pueden dividir en tres categorías principales: unión mecánica, unión adhesiva y soldadura (Fig. 1-2). (Grewell & Benatar, 2007)



**Figura 1-2.** Técnicas principales para la unión de plásticos

Fuente: Welding of plastics: Fundamentals and developments, Grewell & Benatar, (2007)

La unión mecánica implica el uso de sujetadores separados, como tornillos metálicos o poliméricos, o se basa en elementos de diseño integrados que se moldean en las piezas, como las juntas de ajuste a presión. En la unión adhesiva, se coloca un consumible (adhesivo) entre las partes (adherentes) donde sirve como el material que une las partes y transmite la carga a través de la junta. En la soldadura o la unión por fusión, el calor se usa para fundir o ablandar el polímero en la interfaz para permitir la difusión intermolecular del polímero a través de la interfaz y los enredos de la cadena molecular para dar resistencia a la unión. Cada una de estas categorías se compone de una variedad de métodos de unión que se pueden usar en una amplia gama de aplicaciones. (Grewell & Benatar, 2007)

Los procesos de soldadura a menudo se clasifican e identifican por el método de calentamiento que se utiliza. Todos los procesos se pueden dividir en dos categorías generales: calentamiento interno y calentamiento externo. Los métodos de calentamiento interno se dividen en dos categorías: calentamiento mecánico interno y calentamiento electromagnético interno. Los métodos de calentamiento externo dependen de la convección y/o conducción para calentar la

superficie de soldadura. Estos procesos incluyen herramientas calientes, gas caliente, extrusión, inducción de implantes y soldadura por resistencia de implantes. Los métodos de calentamiento mecánico interno se basan en la conversión de energía mecánica en calor a través de la fricción superficial y la fricción intermolecular. Estos procesos incluyen soldadura ultrasónica, soldadura por vibración y por rotación. Los métodos de calentamiento electromagnético interno dependen de la absorción y conversión de la radiación electromagnética en calor. Estos procesos incluyen infrarrojos, láser, radiofrecuencia y soldadura por microondas. (Grewell & Benatar, 2007)

### **2.2.2 Soldadura por fricción**

Aunque la principal ventaja de los plásticos es la facilidad con la que se pueden moldear en formas intrincadas, hay una tendencia creciente hacia la fabricación de artículos de plástico para obtener formas estandarizadas de varillas, láminas, tubos, etc. Además, una gran parte de elementos electrónicos tienen partes plásticas, en su fabricación, se aplican operaciones de acabado que implican algún tipo de técnica de unión para fijar plásticos a sí mismos o a otros materiales. 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 fricción o la soldadura por rotación es única en este aspecto. (Crawford & Tam, 1981)

Como los plásticos son malos conductores del calor, el calor de fricción generado solo en la superficie se transmite lentamente al interior. Por lo tanto, si la acumulación de calor es rápida, como sucede cuando una parte se mantiene estacionaria y en contacto con otra parte que gira muy rápido, las superficies pueden fundirse y formarse una unión sin suavizar el interior. (Crawford & Tam, 1981)

Se informa que la soldadura por fricción se utilizó en Alemania como técnica de unión para plásticos durante la Segunda Guerra Mundial. Sin embargo, durante aproximadamente una década después de la guerra, el interés disminuyó porque se estaban haciendo descubrimientos interesantes en relación con la procesabilidad de los plásticos. (Neumann & Bockhoff, 2013)

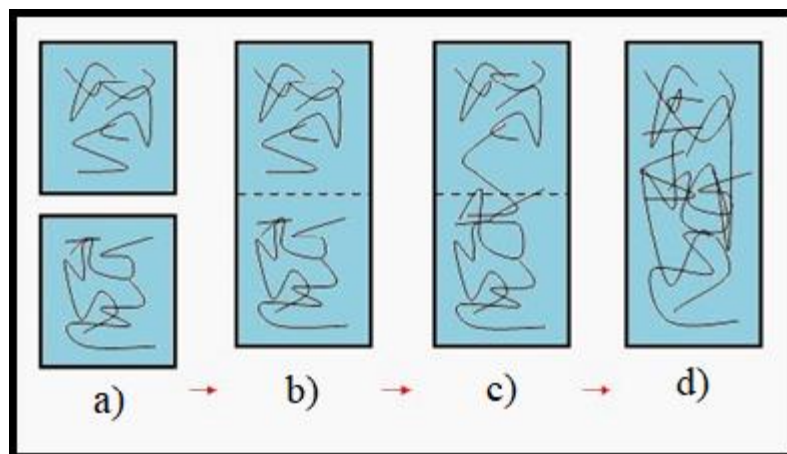
Luego, en la década de 1950, cuando la soldadura por fricción se estableció como un método de unión para metales, hubo un renovado interés en la técnica para plásticos. Quizás sea desafortunado que, aunque ahora hay una gran cantidad de información disponible sobre la soldadura por fricción de metales, haya habido muy poca investigación de interés en la soldadura por fricción de plásticos. (Crawford & Tam, 1981)

En el artículo de (Nicholas, 1976) donde revisó la literatura disponible y concluyó que la técnica de soldadura por fricción es un método de unión viable para muchos plásticos. Se describieron

varias aplicaciones donde se obtuvieron enlaces sólidos y de alta resistencia y se consideró que podría haber un emocionante desarrollo potencial en áreas tales como la industria automotriz.

La soldadura por fricción aprovecha el calor generado por la fricción mecánica entre dos piezas en movimiento. El principio de funcionamiento consiste en que una pieza se mueve relativamente a otra pieza y la soldadura tiene lugar por el reblandecimiento de las zonas a unir. Cuando la cantidad de calor producido por rozamiento es suficiente para llevar a las piezas a la temperatura de soldadura, se detiene bruscamente el movimiento y se ejerce un empuje, el cual produce la soldadura. (Paucar & Suquillo, 2018)

El proceso de la soldadura se simplifica en el siguiente gráfico. Donde la figura 2-2a, indica la primera fase donde los materiales están separados y en estado sólido, la figura 2.2b, representa la fase de calentamiento (fase II), donde empieza el movimiento relativo entre las superficies, la figura 2-2c, indica que los materiales se encuentran en movimiento y se han reblandecido en esta fase se debe detener el movimiento para luego llegar a la fase IV, indicada por la figura 2-2d.



**Figura 2-2.** Proceso de soldadura por fricción simplificado

Fuente: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/11/soldadura-de-plasticos.html> (2013)

Una de las ventajas de la soldadura por fricción es que 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. (Paucar & Suquillo, 2018)

### 2.2.3 *Ventajas y limitaciones de la soldadura por fricción*

Según López (2013) indica que la soldadura por fricción, como cualquier otro proceso de soldadura, tiene ventajas y desventajas específicas, entre las cuales podemos encontrar:

### 2.2.3.1 Ventajas

Las ventajas que López (2013) describe sobre la soldadura por fricción lineal son:

- No requiere de metal de aporte, fundente ni gas protector.
- El proceso es limpio desde el punto de vista ambiental, no se producen arcos, chispas, humo, ni vapores generados cuando las piezas se limpian.
- La soldadora por fricción es apropiada para soldar una gran parte de los materiales de ingeniería y además para la unión de muchas combinaciones de materiales disímiles.
- En la mayor parte de los casos, la resistencia mecánica de la soldadura es equivalente o superior a la resistencia más débil de los dos materiales que se unen.
- No es necesario que el operador tenga habilidades o capacitación en el área de soldadura manual.
- El proceso es fácil de automatizar para grandes volúmenes de producción.
- Las soldaduras se producen con rapidez en comparación con otros procesos de soldadura.
- Proceso recomendado para altos volúmenes de producción.
- Reducción de costos en producción en serie.

### 2.2.3.2 Desventajas

Según López (2013), también indica las limitaciones que tienen la soldadura por fricción lineal.

- En general, una de las piezas de trabajo debe tener un eje de simetría y poder girar alrededor de ese eje, en el caso de la soldadura por fricción rotacional.
- La preparación y alineación de las piezas de trabajo puede ser crucial para que el frotamiento y calentamiento sean uniformes.
- Los costos de capital por equipo y herramental son elevados.
- No es posible soldar materiales auto lubricados, o que no sean forjables.

### 2.2.4 Parámetros y fases en la soldadura por fricción

Algunos de los parámetros clave para la soldadura por fricción se detallan en la siguiente tabla.

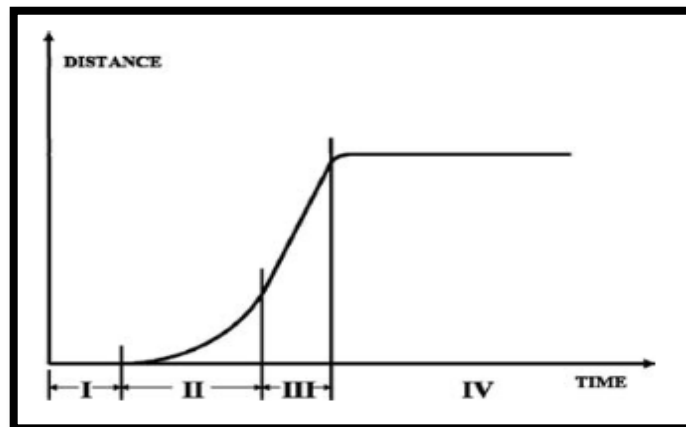
**Tabla 2-1.** Parámetros en el proceso de soldadura por fricción

Variable de proceso	Descripción
Velocidad (rotación-traslación)	Revolución por minuto de cabezal de soldadura – milímetros por segundo de vibración.
Ángulo (soldadura angular)	Ángulo global de movimiento relativo
Tiempo de soldadura	Cantidad de tiempo de operación.

Tiempo de retenimiento	Tiempo en que las piezas se mantienen bajo fuerza después del calentamiento.
Fuerza de soldadura	Cantidad de fuerza aplicada a las partes
Derretimiento	Cantidad de material desprendida durante la soldadura. (Acortamiento de material)

**Fuente:** Welding of plastics: Fundamentals and developments, Grewell & Benatar, (2007)

Stokes (1988) demuestra que la soldadura por fricción tiene cuatro fases distintivas. En la primera fase, el calentamiento se genera mediante calentamiento por fricción interfacial sólido/sólido. Esto hace que algunos materiales termoplásticos con un bajo coeficiente de fricción, como los fluoropolímeros, no sean soldables con estos procesos. Otros materiales como el PE (polietileno) requieren presiones relativamente altas para generar fuerzas de fricción mayores. La segunda fase, es la fase de transición donde el calentamiento por fricción sólido se reemplaza por calentamiento viscoso a través de la deformación por cizallamiento de la delgada capa de fusión que se formó en la interfaz. Durante la fase de transición, el espesor de la capa de fusión aumenta hasta que se alcanza la tercera fase, también conocida como la fase de estado estacionario. Esta fase generalmente se considera la fase óptima para detener el movimiento porque se alcanza un estado estable, donde la tasa de generación de material fundido es igual a la tasa a la que el material se desplaza como material saliente fundido y, por lo tanto, la fundición adicional del material hace poca resistencia a la soldadura y solo produce un desprendimiento de soldadura llamado vuelco o derretimiento. La fase final (fase cuatro) es después de que el movimiento se interrumpe y el material se deja solidificar bajo la presión de sujeción. Las fases se pueden observar fácilmente midiendo la fusión (desplazamiento) en función del tiempo, como se ve en la Fig. 3-2. Usando las velocidades detalladas en la Fig. 4-2, es posible estimar la disipación de potencia para un coeficiente de fricción constante basado en el supuesto fundamental de que la potencia es igual a la velocidad multiplicada por la fuerza de fricción.

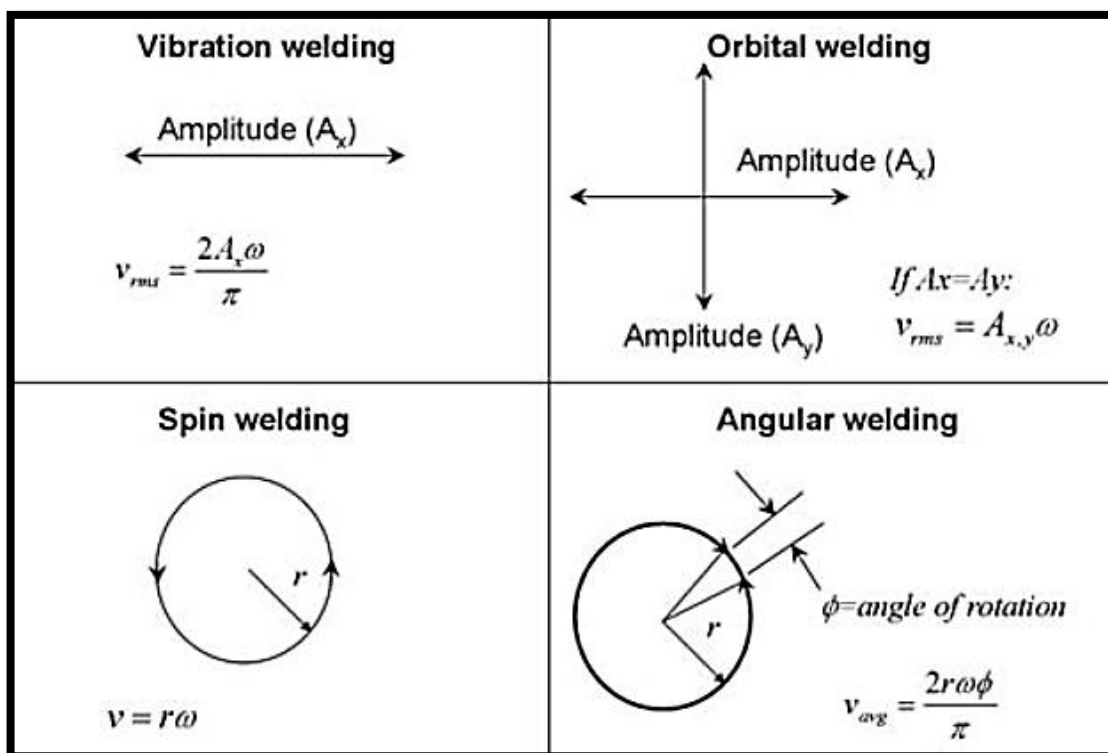


**Figura 3-2.** Fusión típica en función del tiempo para la soldadura por fricción

**Fuente:** Welding of plastics: Fundamentals and developments, Grewell & Benatar, (2007)

### 2.2.5 Tipos de soldadura por fricción

Existen cuatro variaciones principales de la soldadura por fricción: soldadura lineal, orbital, giratoria y angular. La soldadura lineal y orbital son similares en el sentido de que son susceptibles de una amplia gama de geometrías, mientras que, en contraste, la soldadura por rotación y angular son principalmente adecuadas para la geometría de soldadura circular. Los cuatro procesos dependen del movimiento relativo entre las dos partes que se van a unir, lo que resulta en un calentamiento por fricción. La única diferencia importante entre estos procesos es la geometría del movimiento relativo. La figura 4-2 detalla los diversos movimientos y las velocidades correspondientes. Es importante tener en cuenta que, en todos los casos, la velocidad angular ( $\omega$ ) del desplazamiento está en radianes/s. Además, en el caso de la soldadura angular, el ángulo de rotación se define en radianes. Con las velocidades, es posible estimar la disipación de potencia basándose en el supuesto fundamental de que la potencia es igual a la velocidad multiplicada por la fuerza de fricción. (Grewell & Benatar, 2007)



**Figura 4-2.** Tipos de soldadura por fricción

**Fuente:** Welding of plastics: Fundamentals and developments, Grewell & Benatar, (2007)

Existe otro tipo de soldadura por fricción que no se ha mencionado con anterioridad, la soldadura por fricción-agitación (Friction Stir Welding FSW), este tipo de soldadura se analizará a continuación, junto a los 4 tipos de soldadura mencionados anteriormente.

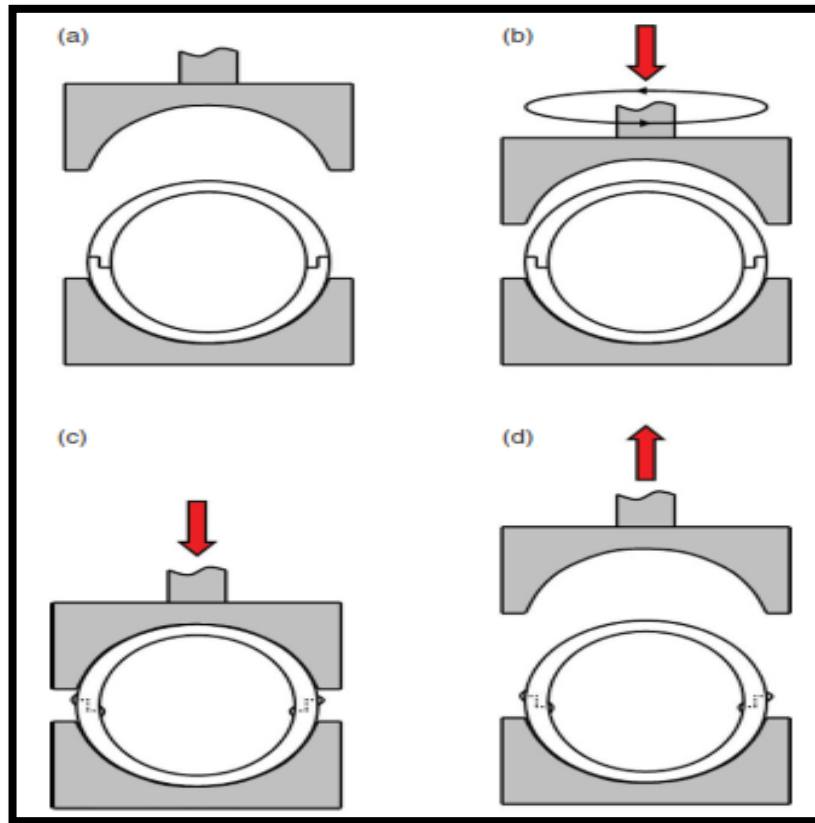
### ***2.2.6 Soldadura por fricción rotacional***

La soldadura por rotación, también conocida como soldadura por fricción giratoria o rotativa, es un proceso en el que las piezas termoplásticas con superficies de unión rotacionalmente simétricas se frotan juntas bajo presión en un movimiento circular unidireccional. Normalmente, una parte se mantiene estacionaria mientras que la otra se gira. El calor que se genera durante este proceso derrite el plástico en la interfaz, formando una soldadura al enfriarse. El proceso puede llevarse a cabo en una máquina dedicada a la soldadura por rotación o en un torno o un taladro de pedestal. (Troughton, 2008)

Según Troughton (2008) en su libro denominado “Handbook of plastics joining: a practical guide” describe que este tipo de soldadura está formado por 4 pasos en el proceso de soldadura que son los siguientes:

Paso 1: Carga de elementos. Esto implica colocar manualmente las piezas en la máquina. A menudo, ambas partes se colocan en un accesorio montado en la base de la máquina de soldar (Fig. 5-2a). Sin embargo, para partes más grandes, la parte superior a menudo se coloca en el accesorio superior, o unidad cabezal. La duración típica del Paso 1 es de 2 a 5 segundos.

Paso 2: Accionamiento de prensa. Este paso es iniciado por el operador, generalmente mediante la activación de dos botones de palma. El cabezal de accionamiento comienza a girar y luego desciende para enganchar la parte superior (Fig. 5-2b). Las velocidades de rotación pueden variar de 200 a 14,000 rpm, dependiendo del tamaño de las piezas a soldar, pero generalmente son alrededor de 2000 rpm. La duración típica del Paso 2 es de 1 a 2 segundos.



**Figura 5-2.** El proceso de soldadura por rotación: (a) cargan en el accesorio inferior; (b) el cabezal impulsor comienza a girar; (c), detención de la rotación y el conjunto enfría bajo presión; (d) los elevadores del cabezal impulsor y la pieza soldada se retira.

**Fuente:** Handbook of plastics joining: a practical guide. Troughton (2008)

Paso 3: Soldadura. Una vez que el cabezal impulsor se engancha en la parte superior, comienza a girar y el movimiento relativo entre las partes genera calentamiento y fusión del material en la interfaz. El proceso de soldadura en sí puede dividirse en cuatro fases. En la Fase I, se produce fricción entre las dos superficies sólidas, generando calor y aumentando la temperatura de interfaz a la temperatura de transición vítrea o al punto de fusión del polímero amorfo o semicristalino, respectivamente. En la Fase II, el material de la interfaz comienza a derretirse. A medida que aumenta el grosor de la masa fundida, parte del material fundido se expulsa de la junta como destello. En la Fase III, se alcanza un estado estable, donde la tasa de generación de material fundido es igual a la tasa a la que el material se desplaza como un destello. Una vez que se alcanza esta etapa, el cabezal de accionamiento deja de girar, ya sea por fricción o mediante un freno, dependiendo del sistema. La duración típica de las Fases I - III es 0.5 - 2 segundos. En la Fase IV, el cabezal impulsor ha dejado de girar y las piezas se mantienen juntas bajo una presión preestablecida para garantizar un contacto íntimo entre las superficies fundidas, y la unión se deja enfriar (Fig. 5-2c). La duración típica de la Fase IV es de 1 a 2 segundos.



Paso 4: eliminación de piezas. Una vez que la soldadura se ha solidificado lo suficiente, se levanta el cabezal de accionamiento y se retiran las piezas (Fig. 5-2d). La duración típica del Paso 4 es de 2 a 5 segundos.

Las máquinas de soldadura por fricción directa son semejantes a los tornos, en el cual se pueden ir ajustando las siguientes variables para controlar la calidad de la soldadura: Velocidad rotacional, Presión de calentamiento, Presión de forjado, Temperatura, Duración del calentamiento. Éstas máquinas son similares a la que se presenta en la figura 6-2.

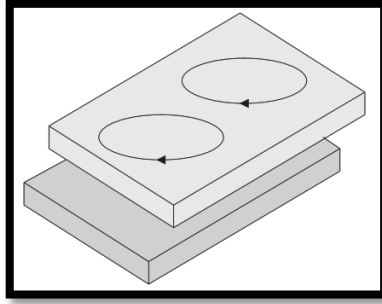


**Figura 6-2.** Máquina para soldadura por fricción rotacional

**Fuente:** Handbook of plastics joining: a practical guide. Troughton (2008)

### **2.2.7 Soldadura por fricción orbital**

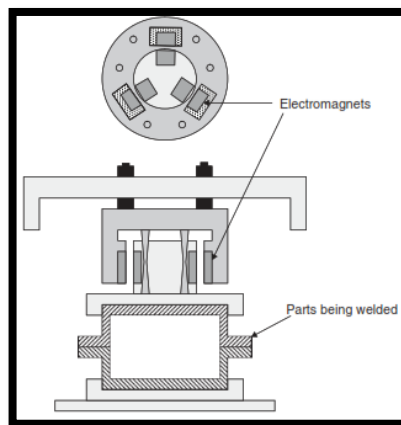
En la soldadura por fricción orbital, una parte se frota con respecto a otra en un movimiento orbital, bajo presión axial, como se muestra en la figura 2-7. A diferencia de la soldadura por vibración lineal, el movimiento relativo de las dos partes en la interfaz es el mismo en todos los puntos alrededor del perímetro, y cambia constantemente de movimiento transversal a movimiento longitudinal.



**Figura 7-2.** Descripción de la soldadura por fricción orbital

**Fuente:** Handbook of plastics joining: a practical guide. Troughton (2008)

La figura 8-2 ilustra el mecanismo de accionamiento utilizado para producir el movimiento orbital. La placa de herramientas superior está montada en tres resortes centrales. Con una separación de 120 ° alrededor de la columna central, se colocan tres electroimanes. Durante el funcionamiento, cada electroimán se activa a su vez, alejando la placa de herramientas de la posición central. Esto continúa durante todo el ciclo de soldadura, produciendo un movimiento orbital. Cuando se completa el tiempo de soldadura, la energía eléctrica de los imanes se apaga y las herramientas vuelven a su posición central original, lo que garantiza una buena alineación de las piezas. Una carga axial es aplicada a lo largo de los ciclos de soldadura y enfriamiento.



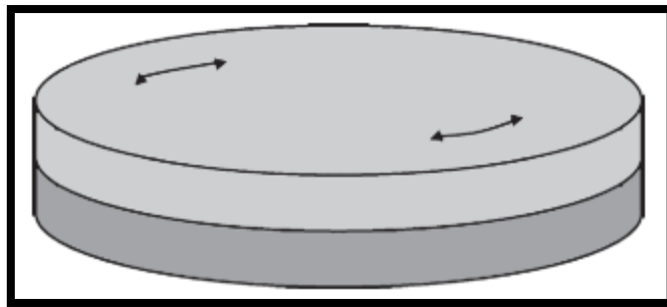
**Figura 8-2.** Descripción de una máquina de soldadura por fricción orbital

**Fuente:** Handbook of plastics joining: a practical guide. Troughton (2008)

Debido a que el movimiento generado es suave, y con amplitudes en el rango de 0.5 - 1.5 mm (0.02 - 0.06 pulgadas), el proceso es más adecuado para componentes con paredes relativamente delgadas (<2 mm; <0.08 pulgadas) o paredes verticales sin soporte. También es mejor para componentes que contienen partes eléctricas sensibles. Además, los tiempos de ciclo tienden a ser más cortos que para la soldadura por vibración lineal. (Troughton, 2008)

### 2.2.8 Soldadura por fricción angular

La soldadura por fricción angular implica el roce de componentes en un movimiento angular y alternativo bajo fuerza axial. El movimiento se indica en la figura 9-2. En principio, es similar al proceso de soldadura por fricción lineal, excepto que el movimiento es angular y se usa para componentes circulares. El arco de vibración es típicamente de 2 a 5 ° con una frecuencia de 100 Hz. El proceso fue desarrollado para componentes circulares donde la configuración de la junta final es crítica, pero no se usa ampliamente en aplicaciones industriales en estos días, desde la llegada de los soldadores por rotación con control posicional. (Troughton, 2008)



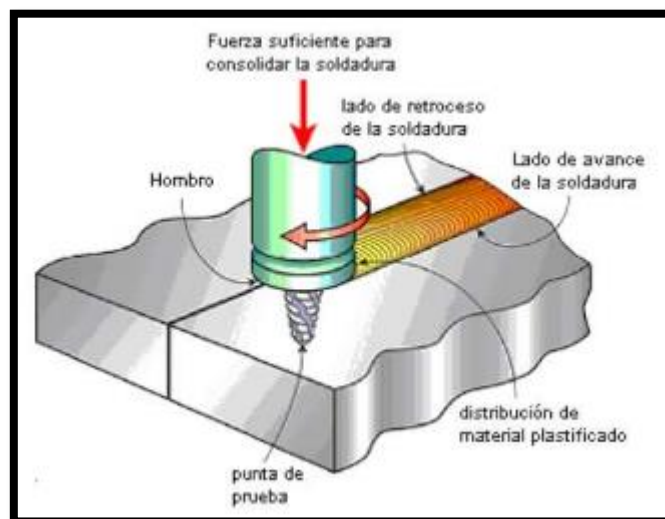
**Figura 9-2.** Descripción por soldadura angular

**Fuente:** Handbook of plastics joining: a practical guide. Troughton (2008)

### 2.2.9 Soldadura por fricción-agitación

La soldadura por fricción y agitación (FSW) es una técnica de unión de estado sólido que se ha expandido rápidamente desde su desarrollo en 1991 y ha encontrado aplicaciones en una amplia variedad de industrias, incluyendo aeroespacial, automotriz, ferroviario y marítimo. El proceso FSW exhibe un número de ventajas atractivas en comparación con otros procesos de soldadura, tal vez el más significativo de los cuales es la capacidad para soldar aleaciones que son difíciles o imposibles de soldar usando técnicas de soldadura por fusión. El proceso FSW tiene lugar en la fase sólida, a temperaturas por debajo del punto de fusión del material, y como un resultado no experimenta problemas relacionados con la resolidificación, como la formación de segundas fases, porosidad, fragilización, y agrietamiento. Además, la temperatura más baja del proceso permite unir con menor distorsión y menores tensiones residuales. FSW es también un proceso de eficiencia energética que no requiere material de relleno y, en la mayoría de los casos, no requiere el uso de un gas de protección. Igualmente, el proceso carece de humos, arco eléctrico, salpicaduras y contaminación asociado con la mayoría de las técnicas de soldadura por fusión; por estas y muchas otras razones, FSW se ha convertido en una unión atractiva proceso para muchos fabricantes. (Paucar & Suquillo, 2018)

La soldadura por fricción y agitación (FSW), desarrollada y patentada por TWI Ltd en el Reino Unido, es una técnica avanzada para unir materiales en una operación continua. En la FSW convencional, una herramienta cilíndrica, de hombro con una sonda reforzada se gira y se sumerge lentamente en la línea de unión entre dos piezas de material de lámina o placa, que se unen (Fig. 10-2). Las piezas se sujetan para evitar que las caras de las juntas contiguas se separen durante el proceso de soldadura. Se genera calor por fricción entre la herramienta de soldadura resistente al desgaste y los materiales a unir. Este calor hace que este último se ablande o se derrita, y permite recorrer la herramienta a lo largo de la línea de unión. El material plastificado se transfiere desde el borde delantero al borde trasero de la sonda de la herramienta y se forja por el contacto íntimo del hombro de la herramienta para producir una soldadura entre las dos piezas. El proceso puede considerarse como una técnica de soldadura de ojo de cerradura ya que se genera un agujero para acomodar la sonda, que luego se llena durante la secuencia de soldadura. (Troughton, 2008)



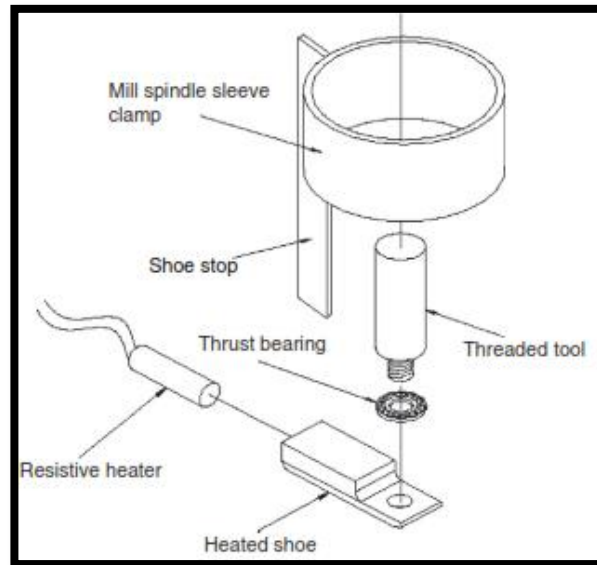
**Figura 10-2.** Proceso de soldadura por fricción agitación

**Fuente:** Soldabilidad y análisis comparativo del comportamiento de la soldadura por fricción (frw) y la soldadura por fricción-agitación (fsw) en los polímeros poliamida pa-66 y polietileno, Paucar y Suquillo (2018).

En el Handbook of plastics joining: a practical guide de (Troughton, 2008) indica que: Aunque este tipo de soldadura tiene mucho éxito en la soldadura de metales, especialmente aleaciones de aluminio, la FSW convencional presenta los siguientes problemas al soldar plásticos:

- Dificultad para retener el material en la línea de unión, resultando en huecos en la unión soldada.
- Dificultad para crear una mezcla uniforme de polímeros en la línea de unión.
- Baja velocidad de soldadura.
- Una corona no uniforme o cordón de soldadura

Para resolver estos problemas, la Universidad Brigham Young desarrolló una herramienta de zapata (Fig. 11-2) a través de la cual pasa la sonda giratoria. Con esta disposición, el calor no se produce por calentamiento por fricción desde el hombro, sino por el zapato caliente que también restringe la expulsión del material fundido de la línea de unión. (Troughton, 2008)



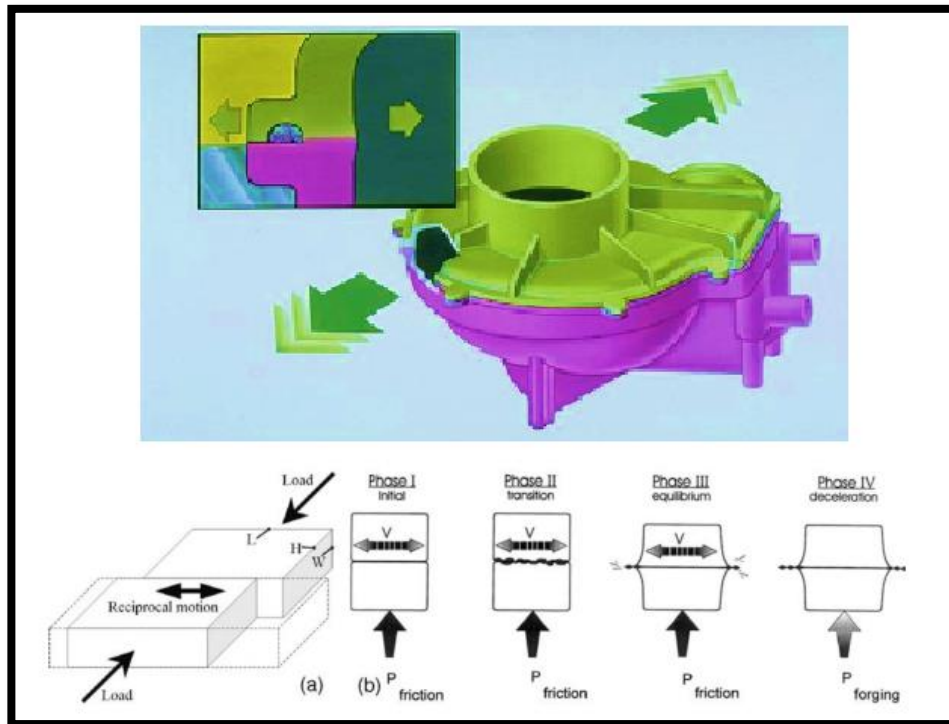
**Figura 11-2.** Sistema de zapata caliente para FSW de termoplásticos.

Fuente: Handbook of plastics joining: a practical guide. Troughton (2008)

### **2.2.10 Soldadura por fricción lineal (Vibration welding)**

La soldadura por vibración utiliza el calor generado por la fricción en la interfaz de dos materiales para producir la fusión en el área interfacial. 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.

Los dos tipos principales de soldadura por vibración son: lineal, en el que la fricción se genera por un movimiento lineal y alternativo (Fig. 12-2), y orbital, en el que la parte superior a unir se vibra en un movimiento circular. La soldadura por vibración lineal se usa con mayor frecuencia, pero la soldadura por vibración orbital hace posible la soldadura de piezas de plástico de forma irregular. (Troughton, 2008)



**Figura 12-2.** Soldadura por fricción lineal

**Fuente:** Handbook of plastics joining: a practical guide. Troughton (2008)

Los parámetros del proceso son la amplitud y frecuencia de vibración, presión de soldadura y tiempo de soldadura, todo lo cual afecta la resistencia de la soldadura resultante.

El proceso de soldadura por fricción lineal al igual que los otros tipos de soldadura, consta de cuatro fases.

En la Fase I, el calor generado por fricción eleva la temperatura del área interfacial a la temperatura de transición vítrea de los termoplásticos amorfos o el punto de fusión de los plásticos semicristalinos. Dado que el material todavía está en estado sólido, no hay desplazamiento (penetración), la distancia a través de la cual las partes se acercan durante la soldadura debido al flujo lateral de material fundido, en esta fase. En la Fase II, el material en la interfaz comienza a fundirse y fluir en una dirección lateral, causando un aumento en el desplazamiento de la soldadura. En la Fase III, la tasa de generación de masa fundida es igual a la tasa de desplazamiento de masa fundida, que por lo tanto aumenta linealmente con el tiempo. Al final de la Fase III, el movimiento vibratorio se detiene, y durante la Fase IV, la penetración de la soldadura aumenta ligeramente a medida que la película fundida se solidifica bajo presión. (Troughton, 2008)

### *2.2.10.1 Ventajas y desventajas de la soldadura por fricción lineal*

Las ventajas de la soldadura por vibración incluyen tiempos de ciclo relativamente cortos, eficiencia energética, capacidad de soldar piezas grandes e insensibilidad a la preparación de la superficie. Debido al desgaste de la acción de la fricción, se pueden obtener soldaduras en superficies que se han metalizado al vacío, pintado o contaminado. No se introducen materiales adicionales como en las técnicas de soldadura de implantes o la unión adhesiva, por lo que la interfaz de soldadura está compuesta del mismo material que las partes soldadas. (Stokes, 1988b)

El calentamiento se localiza en gran medida, en contraste con la soldadura de herramientas en caliente, y es mucho menos probable que ocurra la degradación del material resultante del sobrecalentamiento en la interfaz. Las propiedades de transmisión de los materiales no tienen efecto sobre la soldadura por vibración, como lo hacen en la soldadura ultrasónica. (Stokes, 1988b)

Las piezas se pueden soldar independientemente de cómo se procesaron (moldeado por inyección, extruido, formado al vacío, etc.). Las soldaduras por vibración producen sellos herméticos de alta resistencia y ajuste a presión. En materiales transparentes, la soldadura es ópticamente transparente. La soldadura por vibración debe usarse solo en conjuntos que no tienen tolerancias estrictas; Aunque los puntos de fusión de los plásticos son predecibles, la ubicación en la que se solidifica la masa fundida puede variar ligeramente. (Stokes, 1988b)

(Troughton, 2008) en su libro indica que: un inconveniente de la soldadura por vibración es el alto costo inicial de capital del equipo y las herramientas en comparación con otros procesos, como la placa caliente o la soldadura ultrasónica. Sin embargo, esto debe juzgarse por la capacidad de soldar piezas más grandes de una sola vez, con un ciclo de procesamiento más rápido. Un problema que a veces surge en la soldadura por vibración implica la conversión de toda la energía que se origina del movimiento vibratorio en energía térmica en la zona de unión. La energía cinética se convierte en energía térmica tanto por fricción interna como por fricción interfacial. La fricción del material sólido en la Fase I puede causar altas fuerzas de flexión, por lo que se debe usar una sujeción adecuada, y el termoplástico debe ser lo suficientemente rígido para evitar la deformación. Esto es particularmente importante en la soldadura de espesor cruzado, en la que la dirección de la vibración está en ángulo recto con la pared del componente. En la práctica, esto se encuentra prácticamente en todas las partes, ya que todas las partes a soldar poseen paredes tanto en la dirección de la vibración como en ángulo recto. Si se produce un flexión en la pared, se produce un movimiento de fricción limitado o cero entre las partes a unir, evitando la formación de soldadura alrededor de todo el componente.

Esto se puede superar agregando costillas rígidas a las secciones de pared delgada. En casos extremos, donde hay una desviación excesiva en las partes, el plástico puede comenzar a derretirse directamente en el punto de sujeción, el punto de desviación máxima; cuando esto sucede, no se puede hacer una soldadura (Troughton, 2008)

Al soldar piezas grandes que son difíciles de asegurar en los accesorios de soporte, ya sea debido a variaciones dimensionales o debido a la falta de características prominentes, se produce un movimiento relativo entre la pieza y el accesorio, lo que resulta en el deslizamiento de la pieza y la pérdida de energía. (Grewell & Benatar, 2007)

No siempre se puede obtener una soldadura satisfactoria a altas frecuencias; en este caso, el uso de frecuencias más bajas es necesario para lograr una alta resistencia de soldadura. Una característica del proceso, que es un inconveniente para algunas aplicaciones de uso final, es la generación de partículas finas o pelusas en la línea de unión. El fenómeno es más pronunciado con los plásticos duros y ocurre durante la Fase I del ciclo a medida que las asperezas superficiales se cortan. Esto se puede reducir precalentando las superficies antes de soldar. Otra desventaja de la soldadura por vibración es la generación de sonido, que suele ser de 90 a 95 dB. Por lo tanto, se requieren recintos acústicos para reducir el ruido a un nivel aceptable.(Troughton, 2008)

#### *2.2.10.2 Materiales que se pueden soldar*

Casi cualquier termoplástico puede ser soldado por vibración: cristalino, amorfo, relleno, espumado y reforzado. Los únicos polímeros que pueden ser difíciles de soldar son los fluoropolímeros, debido a su bajo coeficiente de fricción. (Stokes, 1988b)

Las propiedades de los materiales a soldar afectan la resistencia de la soldadura. La absorción de agua durante el almacenamiento aumenta el contenido de humedad de algunos termoplásticos, lo que a veces puede conducir a la formación de burbujas en el área de unión y a la disminución de la resistencia de la soldadura, aunque el nylon y otras resinas higroscópicas pueden soldarse sin secado previo. En general, los materiales con altos puntos de fusión requerirán un mayor aporte de energía y, por lo tanto, tiempos de soldadura más largos. (Troughton, 2008)

En el libro “Handbook of plastics joining: a practical guide” de (Troughton, 2008) determina que al soldar materiales diferentes, las propiedades de los dos materiales a soldar influyen en el comportamiento de soldadura y afectan la resistencia de la soldadura. La soldadura por vibración generalmente se puede usar para unir dos materiales que difieren en las temperaturas de fusión en hasta 38° C (68 °F). El grado de interdifusión de los dos materiales que ocurre en el estado fundido difiere significativamente para diferentes materiales, dependiendo de los coeficientes de difusión,



los pesos moleculares y las densidades de energía cohesiva, y afecta la morfología de la soldadura. El cruce de los dos polímeros fundidos produce enclavamiento mecánico en la interfaz de soldadura. Las curvas de penetración versus tiempo son similares a las de soldar el mismo material, pero las diferentes temperaturas de fusión de los dos polímeros pueden dar como resultado un aumento constante de la resistencia de la soldadura con penetración, incluso después de que se haya alcanzado el umbral de penetración. Esto resulta en un aparente estado estable debido a la fusión y al flujo del polímero de menor fusión que domina la penetración en las primeras etapas. A medida que aumenta la temperatura, el polímero de mayor fusión se funde a una velocidad más rápida y luego alcanza un estado estable. El aumento de la penetración conduce a una mayor resistencia; a altas penetraciones, se puede obtener una resistencia de soldadura igual a la del material puro más débil. Debido a este comportamiento, las curvas de penetración versus tiempo por sí solas no se pueden usar para determinar las condiciones óptimas de los parámetros para soldar materiales diferentes. Los termoplásticos que son compatibles incluyen ABS a PC, ABS a acrílico, SAN (estireno acrilonitrilo) a acrílico, SAN a poliestireno (PS) y PC a acrílico. No hay combinaciones en las que un material amorfo sea compatible con un material semicristalino.

#### *2.2.10.3 Equipo de soldadura por fricción lineal*

Por necesidad, las máquinas de soldadura por vibración son grandes para garantizar que haya una masa suficiente para evitar que el equipo se mueva durante el ciclo de vibración. Debido al ruido generado por el proceso de soldadura, los paneles de aislamiento acústico están integrados en las paredes de la máquina para proteger al operador y a los presentes cerca. Estos generalmente reducen el sonido a valores inferiores a 85 dB. Una típica máquina de soldadura por vibración lineal se muestra en la siguiente figura. (Troughton, 2008)

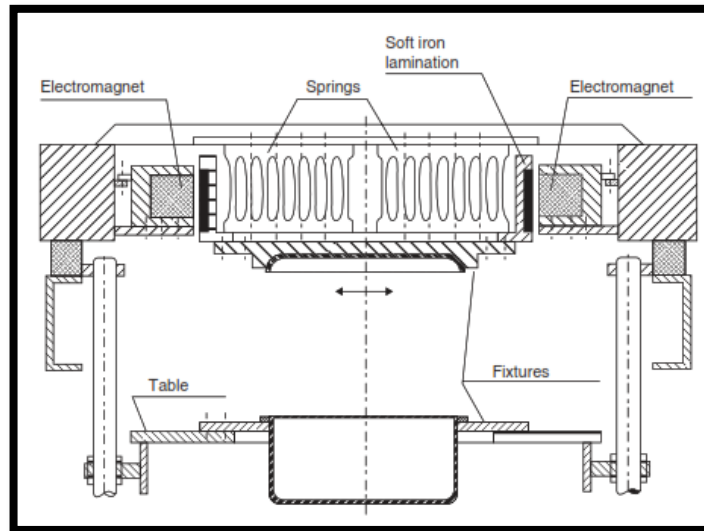


**Figura 13-2.** Una máquina de soldadura por fricción lineal típica

**Fuente:** Handbook of plastics joining: a practical guide. Troughton (2008)

El equipo se clasifica como baja frecuencia (120 - 135 Hz) o alta frecuencia (180 - 260 Hz) y puede ser de frecuencia variable o frecuencia fija. El equipo de frecuencia variable se acciona eléctricamente y se pueden hacer ajustes para ajustar la frecuencia para que coincida con la pieza y la masa de herramientas. El equipo de frecuencia fija se acciona hidráulicamente y se necesita una masa de herramientas/piezas predeterminada específica. Las máquinas que funcionan a altas frecuencias necesitan menos movimiento y menos espacio entre las piezas. (Troughton, 2008)

Los tres componentes principales de una soldadora de vibración lineal son: un conjunto de vibrador suspendido en resortes, una mesa elevadora y accesorios de herramientas. Un esquema de los componentes se muestra en la figura 14-2. El conjunto vibrador es un elemento móvil sin superficies de apoyo y es impulsado por pistones hidráulicos o electroimanes. La mayoría de los sistemas comerciales utilizan el sistema de vibración electromagnética, que consta de dos electroimanes, uno en cada extremo del sistema de resorte, que se energizan alternativamente. Los resortes resuenan a la frecuencia de la energía electromagnética, sostienen el conjunto del vibrador contra la presión de soldadura vertical y proporcionan una alineación precisa entre las piezas a soldar al devolver el conjunto del vibrador a su posición inicial al final del ciclo de soldadura. Una de las partes a soldar está unida al conjunto del vibrador en la herramienta superior y la otra parte está sujeta a la herramienta fijada a la mesa elevadora, el elemento estacionario. (Troughton, 2008)



**Figura 14-2.** Esquema de una máquina de soldadura por fricción lineal

**Fuente:** Handbook of plastics joining: a practical guide. Troughton (2008)

Las herramientas utilizadas en los equipos de soldadura por vibración son relativamente simples y consisten en placas de aluminio mecanizadas para ajustarse al contorno de las piezas en la junta. Las herramientas deben proporcionar un buen soporte para garantizar que se aplique una presión uniforme a las interfaces de soldadura durante el ciclo de soldadura. Es esencial que no haya movimiento relativo entre las piezas y los accesorios de herramientas durante la soldadura; de lo contrario, se reducirá la amplitud entre las interfaces de soldadura. Se utilizan ganchos de sujeción y pestillos simples. Se pueden utilizar abrazaderas neumáticas con las herramientas inferiores, mientras que las herramientas superiores pueden incorporar ventosas para mantener los componentes en posición antes de soldar. Tanto las herramientas superiores como las inferiores contarán con puertos de alineación en los que se pueden colocar pasadores para ayudar con la precisión de la ubicación durante la configuración. (Troughton, 2008)

Hay disponible una amplia gama de equipos de soldadura por vibración, con costos que van desde US \$ 40,000 a \$ 250,000, dependiendo del tamaño y las opciones. Las opciones disponibles incluyen control cerrado de distancia de fusión, control de proceso estadístico y carga robótica. El monitoreo preciso de la posición de la mesa y el control de la fusión durante la soldadura se logran utilizando un transductor de desplazamiento lineal (LDT), que elimina la necesidad de interruptores de límite de posición de la mesa discretos y sensores de proximidad. Los sistemas hidráulicos de elevación y sujeción de velocidad variable aseguran un posicionamiento suave y preciso de la platina y hacen posible el uso de múltiples presiones de soldadura y retención. (Troughton, 2008)

### **2.2.11 Parámetros de soldadura por fricción lineal**

La mayoría de las máquinas industriales de soldadura por vibración funcionan a frecuencias de soldadura de 100 a 240 Hz, aunque también hay disponibles máquinas con frecuencias más altas. 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 (típicamente 1 a 3 segundos), con tiempos de solidificación, después de que el movimiento vibratorio ha cesado, generalmente de 4 a 10 segundos. Los tiempos de ciclo totales generalmente varían de 6 a 15 segundos, lo que resulta en 4 a 10 ciclos por minuto. (Stokes, 1988a)

Troughton (2008) indica que: 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:

$$V = 2af \quad \text{(Ecuación1)}$$

En general, la velocidad para soldar debe estar entre 500 y 1000 mm/s (20–40 pulgadas/s). Las amplitudes de soldadura más bajas (0.7 - 1.8 mm; 0.03 - 0.07 pulgadas) se usan con frecuencias más altas (240 Hz), y las amplitudes más altas (2-4 mm, 0.08 - 0.16 pulgadas) se usan con frecuencias más bajas (100 Hz) para producir soldaduras efectivas. En general, se utilizan altas frecuencias cuando los espacios libres entre las piezas están restringidos a menos de 1,5 mm (0,06 pulgadas) y/o cuando el flash no es deseable, como en la soldadura de depósitos de líquido de freno y dirección. (Troughton, 2008)

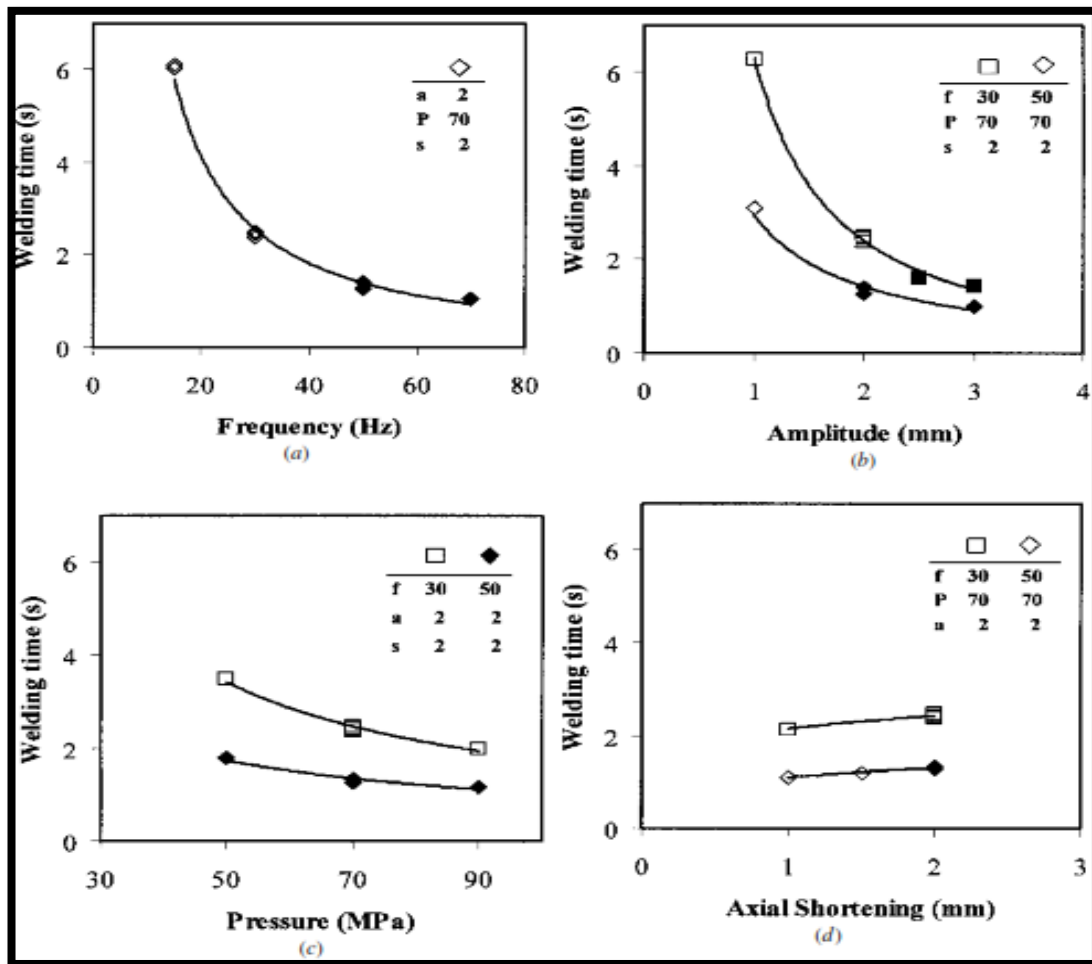
Las mayores amplitudes de la soldadura de baja frecuencia son ventajosas para soldar piezas con paredes laterales largas, delgadas y sin soporte orientadas perpendicularmente a la dirección de la vibración. Estas partes son susceptibles a la flexión, lo que inhibe la soldadura; sin embargo, el mayor desplazamiento de la soldadura de baja frecuencia en muchos casos anula los efectos de la flexión, de modo que se puede obtener una soldadura. (Troughton, 2008)

La presión de soldadura varía ampliamente (0.5 - 20 MPa; 72–2900 psi), aunque generalmente se usan presiones en el extremo inferior de este rango (0.5 - 2.0 MPa; 72 - 290 psi). Las presiones más altas disminuyen el tiempo de soldadura; sin embargo, aumentar la presión de soldadura puede reducir la resistencia de la soldadura al forzar todo el plástico fundido, lo que da como resultado una soldadura "fría" que se forma. Por ejemplo, en nylon, la resistencia de la soldadura

se reduce hasta en un 40% al aumentar la presión de la soldadura de 1 a 20 MPa (145 a 2900 psi). La resistencia de la soldadura generalmente no es muy sensible a la frecuencia y la amplitud de la vibración, aunque algunos materiales (es decir, polieterimida) requieren altas frecuencias para alcanzar altas resistencias de soldadura. (Stokes, 1988a)

El aumento de la presión de soldadura o la amplitud de la vibración aumenta la velocidad de penetración y disminuye el tiempo de soldadura al disminuir el tiempo requerido para alcanzar la Fase III. Las máquinas de soldadura por vibración tienden a tener dos modos de control para regular el ciclo de soldadura. Estos son los métodos de "soldadura por tiempo" y "soldadura por desplazamiento". Al soldar por tiempo, el tiempo de soldadura es el tiempo que las partes plásticas se frotan para crear el calor. Idealmente, el tiempo debería terminarse cuando se alcanza la fase de estado estable del ciclo de soldadura. Los materiales con puntos de fusión más altos tienden a requerir un mayor tiempo de soldadura. En el método de soldadura por desplazamiento, las piezas se hacen vibrar hasta que se logra un desplazamiento de material fijo, típicamente 1 - 2 mm (0.04 - 0.08 pulgadas). El valor de desplazamiento seleccionado debe ser suficiente para garantizar que se produzca la fusión en estado estacionario, y también debe compensar cualquier posible desviación de la planitud de las superficies. Si hay superficies que están diseñadas para no soldarse, el método de desplazamiento puede garantizar que estas superficies no entren en contacto al final del ciclo de soldadura. (Troughton, 2008)

En el trabajo de (Wanjara & Jahazi, 2005), denominado: "Linear friction welding of Ti-6Al-4V: Processing, microstructure, and mechanical-property inter-relationships", determina: A partir de los diversos experimentos de unión, una evaluación del efecto de los parámetros de procesamiento, en particular, la frecuencia de oscilación ( $f$ ), la amplitud de la oscilación ( $a$ ), la presión de fricción ( $P$ ) y el acortamiento axial ( $s$ ), determinaron las características de unión del Ti-6Al-4V por soldadura por fricción lineal. La Figura 2-15 muestra gráficos del tiempo para soldar en función de los diversos parámetros de procesamiento, con condiciones de soldadura (sin porosidad u óxidos) indicadas por marcadores rellenos.



**Figura 15-2.** Representación del tiempo de soldadura en función de (a) frecuencia de oscilación  $f$ ; (b) amplitud de oscilación  $a$ ; (c) presión de fricción  $P$ ; y (d) acortamiento axial  $s$ . Los marcadores abiertos y llenos denotan las condiciones no soldadas (con óxidos o huecos en la interfaz de la unión) y soldadas, respectivamente.

**Fuente:** Linear friction welding of Ti-6Al-4V: Processing, microstructure, and mechanical-property inter-relationships, (Wanjara & Jahazi, 2005)

Se observó que el efecto de la frecuencia y la amplitud en el tiempo de soldadura resultante era mayor que el de la presión de fricción y el acortamiento axial. Específicamente, se observó que el tiempo de soldadura disminuía de aproximadamente 1 a 6 segundos con un aumento en la frecuencia de 15 a 70 Hz o un aumento en la amplitud de oscilación de 1 a 3 mm, con todos los demás parámetros mantenidos constantes. (Wanjara & Jahazi, 2005)

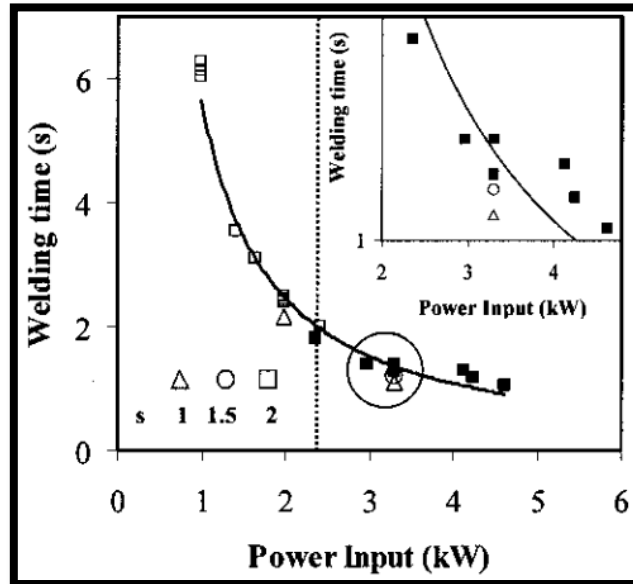
El efecto de la presión en el tiempo de soldadura mostró una disminución de aproximadamente 50% en el tiempo al duplicar la presión, con los otros parámetros mantenidos constantes. Alternativamente, duplicar el acortamiento axial produjo un aumento aproximado en el tiempo de soldadura de 20%. Los efectos relativos de la frecuencia, la amplitud y la presión sobre el tiempo

de soldadura pueden razonarse sobre la base de la entrada de potencia requerida para alcanzar condiciones críticas de tensión y temperatura en la interfaz de soldadura. (Wanjara & Jahazi, 2005)

En particular, el trabajo de Vairis & Frost (1998) ha indicado que se puede usar un parámetro de entrada de potencia (PI) específico para caracterizar los parámetros del proceso de la siguiente manera:

$$PI = \frac{afP}{2\pi A} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde A es el área de la sección transversal de la soldadura,  $\alpha$  es la amplitud de movimiento, f la frecuencia y P la presión entre las piezas a soldar. Usando la ecuación [2], los valores de entrada de potencia se calcularon para las condiciones de procesamiento utilizadas en el trabajo de Vairis & Frost (1998), suponiendo que el área de la sección transversal de la soldadura era igual a la de la muestra. Una gráfica (fig. 16-2) de la dependencia del tiempo de soldadura de la entrada de potencia indica una relación inversa, lo cual es intuitivo, ya que una mayor entrada de potencia generada por frecuencias, amplitudes o presiones más altas requiere un tiempo menor para producir la consolidación de la soldadura.



**Figura 16-2.** Gráfico de la dependencia del tiempo de soldadura de la entrada de potencia para varios valores de acortamiento axial.

**Fuente:** Linear friction welding of Ti-6Al-4V: Processing, microstructure, and mechanical-property inter-relationships, Wanjara & Jahazi (2005)

### 2.2.12 Modelo de contacto, generación de calor y calor de entrada

En los últimos años, se emplean softwares 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 termomecánicos transitorios. Estas técnicas computacionales especiales se utilizan en estos modelos para tratar las peculiaridades de la soldadura por fricción. (Wenya et al., 2014)

Por lo general, según Wenya, Wang, Shanxiang, & Tiejun, (2014) 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:

$$\tau_{fric} = \mu P \quad (\text{Ecuación 3})$$

Dónde  $\tau_{fric}$  es el esfuerzo cortante de fricción,  $\mu$  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:

$$Q_{fric} = n v \tau_{fric} = n v \mu P \quad (\text{Ecuación 4})$$

Dónde  $v$  es la velocidad de deslizamiento, que puede depender de la posición relativa en diferentes procesos de soldadura por fricción 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 una ley de fricción de Coulomb modificada, donde la tensión de flujo equivalente del material se utiliza de la siguiente manera: (Wenya et al., 2014)

$$\tau_{fric} = \tau_{cort} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \quad (\text{Ecuación 5})$$



Dónde  $\tau_{cort}$  es el esfuerzo cortante de fluencia calculado a partir del esfuerzo de fluencia equivalente  $\sigma_s$ . Por lo tanto, la generación de calor ( $q$ ) durante FW podría expresarse de la siguiente manera: (Wenya et al., 2014)

$$q = nv \text{Min}(\mu P, \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}) \quad (\text{Ecuación 6})$$

(Wenya et al., 2014) indica que 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:

$$q = \frac{nv\sigma_s}{\sqrt{3}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Esta suposición ha demostrado ser efectiva por Wenya & Feifan (2011).

### **2.2.13 Polimetilmetacrilato PMMA (Acrílico)**

Paucar & Suquillo (2018) indican que el acrílico (PMMA Polimetilmetacrilato) es un material plástico, capaz de soportar largos períodos de tiempo a la intemperie, dicho producto se obtiene por la polimerización catalizada del monómero metil metacrilato. Este proceso incluye el calentamiento, mezclado, destilación, coloración, inyección en moldes de vidrio templados, y la polimerización final en piscinas a temperatura controlada. En su estado natural es incoloro, pero se puede pigmentar para obtener una infinidad de colores. También se puede dejar sin pigmento para ser completamente transparente. El acrílico es inerte a muchas sustancias corrosivas y posee diversas ventajas entre las que se destacan las siguientes:

Resistencia a la interperie: El PMMA ofrece una resistencia a la intemperie que no iguala ningún otro material plástico. Resiste la exposición a radiación solar intensa, al frío extremo, a cambios súbitos de temperatura, a la brisa salada y a otras condiciones meteorológicas. Es un material cuyas cualidades estéticas y funcionales permanecen intactas durante muchos años de servicio. (Paucar & Suquillo, 2018)

- Su pérdida de transparencia y claridad es prácticamente nula incluso en aplicaciones al aire libre.
- También su capacidad de filtrar la radiación ultravioleta es sumamente estable y prácticamente no muestra cambios ni por el paso del tiempo ni por la exposición a la intemperie.

- La estabilidad contra deterioro por exposición a la intemperie se refiere al acrílico cristalino. El PMMA pigmentado puede decolorarse a distintos grados dependiendo de los colorantes que se utilicen.

Resistencia al Impacto: Como se indica en la tabla 2-2, la resistencia al impacto de la lámina de acrílico es superior a la del vidrio de diferentes especificaciones. (Paucar & Suquillo, 2018)

**Tabla 2-2.** Resistencia al Impacto de Lámina de PMMA comparada con la de Vidrio de diferentes tipos.

Dimensiones	Espesor (mm)	Peso de bola de acero en caída libre en kg	Energía necesaria para romper el material en libras-pie
Lámina de acrílico	2,5	0,11	3
	5	0,91	4,7
	4,5	0,91	11,1
	6	2,27	18,1
Cristal de ventana	2,5	0,11	0,8
Cristal doble resistencia	3		1,8
Cristal flotado	4,8		2
	6,4		1
Vidrio de seguridad laminado	6,4	0,11	1,1
Rough WireGlass, impacto sobre lado áspero			2,2
Rough WireGlass, impacto sobre lado liso			0,2
Wireglass pulido			0,4

**Fuente:** Soldabilidad y análisis comparativo del comportamiento de la soldadura por fricción (frw) y la soldadura por fricción-agitación (fsw) en los polímeros poliamida pa-66 y polietileno, Paucar & Suquillo (2018)

Transmisión de luz: El PMMA no pigmentado, es decir cristalino, es tan transparente como el cristal más fino. Su tasa de transmisión de luz es de 92%. La calidad óptica con la que se aprecian los objetos a través de una lámina de PMMA es casi perfecta. La tasa de pérdida de definición óptica a causa de dispersión de rayos de luz, es solamente de un promedio de 1%. (Paucar & Suquillo, 2018)

Peso: El peso de la lámina de acrílico corresponde al 50% del peso del vidrio y al 43% del peso del aluminio, en la tabla 3-2 se puede observar los pesos del acrílico con respecto a su espesor. (Paucar & Suquillo, 2018)

**Tabla 3-2.** Pesos de láminas de láminas de acrílico en relación con su espesor

Peso (lb/pie <sup>2</sup> )	Espesor (pulg.)
0,74	0,118
1,10	0,177
1,48	0,236

**Fuente:** Soldabilidad y análisis comparativo del comportamiento de la soldadura por fricción (frw) y la soldadura por fricción-agitación (fsw) en los polímeros poliamida pa-66 y polietileno, Paucar & Suquillo (2018)

**Resistencia química:** La lámina de acrílico es excelentemente resistente a la mayoría de las sustancias, incluyendo soluciones de álcalis y ácidos como el amoníaco y el ácido sulfúrico, e hidrocarburos alifáticos como hexano, octano y nafta. Los hidrocarburos aromáticos atacan al acrílico y los compuestos orgánicos como la acetona, el benceno y el tolueno lo disuelven. La resistencia química del material puede ser influenciada por una variedad de factores incluyendo las tensiones generadas durante el proceso de fabricación y durante el uso, por ejemplo, por cambios de temperatura. El contacto con ciertos selladores y juntas puede causar el cuarteamiento de la lámina bajo ciertas condiciones. La resistencia al cuarteamiento depende de factores como a qué tensión se expone la lámina y durante cuánto tiempo, y la temperatura. (Paucar & Suquillo, 2018)

**Termoformado:** Al calentar el PMMA a una temperatura óptima para su termoformado, entre los 163 y los 176 grados centígrados, este se vuelve suave y flexible y puede ser moldeado para darle casi cualquier forma deseada. Al enfriarse el material vuelve a endurecer, conservando la forma que se la haya dado. Dado que el PMMA se moldea bajo poca presión, se pueden usar moldes económicos de madera o plástico. Esto permite que arquitectos y diseñadores especifiquen modelos complejos que pueden ser producidos a un costo muy razonable incluso en cantidades pequeñas. (Paucar & Suquillo, 2018)

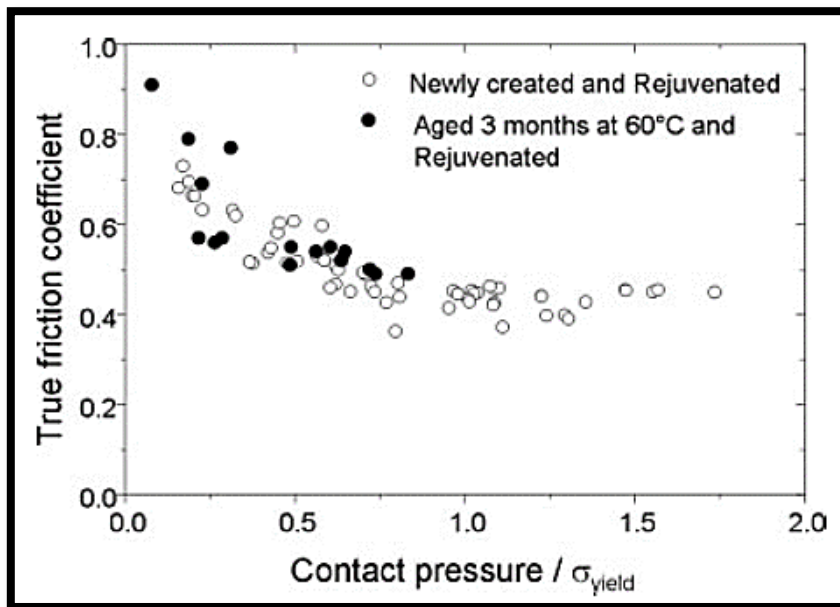
**Conductividad térmica:** La velocidad a la que se conduce el calor a través de un sólido en estado estacionario, se mide por la conductividad térmica, que tiene unidades: W/m.K. Para el acrílico la conductividad tiene un rango entre 0.0837 – 0.251 W/m.°C. (CES Edupack, 2013).

**Calor específico:** Es la cantidad de energía que se requiere para calentar un material. La energía para calentar 1 kg por 1°C se denomina calor específico o capacidad calorífica, y dado que la medición generalmente se realiza a presión constante (presión atmosférica) está dado por el símbolo Cp, sus unidades son J/kg.K. Para el acrílico el calor específico tiene un rango 1490 – 1610 J/kg°C. (CES Edupack, 2013).

**Coefficiente de fricción:** En la investigación de (Charrault et al., 2008), indica que la fricción de polímeros muestra una fuerte dependencia de la temperatura, la presión y la velocidad de deslizamiento. El origen de esta dependencia a menudo se atribuye a la termodinámica de la superficie, mientras se descuida la influencia de la mecánica de contacto a nivel local. Se realizaron experimentos de rascado y deslizamiento en PMMA en estado vítreo en una amplia gama de presiones de contacto. Se encontró que el coeficiente de fricción varía de 0.25 a más de 0.8 y éste disminuye con el envejecimiento físico del polímero. Cualquiera que sea el envejecimiento, para una alta presión de contacto y un contacto totalmente plástico, el verdadero coeficiente de fricción tendió a un valor único. Hay un valor particular del coeficiente de fricción ( $\approx 0.5$ ) por encima del cual se produce el cizallamiento incluso a baja presión de contacto y por

debajo del cual no se produce el cizallamiento si la presión también está por debajo del límite elástico. Sobre la base de estas consideraciones, fue posible racionalizar cualitativamente las complejas propiedades experimentales de la fricción de PMMA.

Por tanto, podemos decir que el Acrílico o PMMA es un material que tiene un valor alto para el coeficiente de fricción el cual puede variar desde 0.25 a más de 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, como se puede ver en la siguiente gráfica 17-2.



**Figura 17-2.** Comparación de las propiedades de fricción de una superficie recién creada con las de la misma superficie envejecida y rejuvenecida térmicamente.

**Fuente:** Structural Recovery (Physical Ageing) of the Friction Coefficient of Polymers, Charrault et al., 2008

## CAPÍTULO III

### 3 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

#### 3.1 Identificación de variables

##### *3.1.1 Variable independiente*

Diseño y construcción de la máquina.

##### *3.1.2 Variable dependiente*

Calidad de la soldadura.

##### *3.1.3 Variable interviniente*

Parámetros de soldadura

#### 3.2 Operacionalización de las variables

**Tabla 1-3.** Tabla de operacionalización de las variables.

Variable	Tipo de variable	Categorías o Dimensiones	Definición	Indicador	Unidad de medida	Índice	Instrumento
Diseño y construcción de la máquina	Independiente	a. Mecanismos b. Estructura c. Materiales	a. Conjunto de piezas o elementos que ajustados entre sí y empleando energía mecánica hacen un trabajo o cumplen una función. b. Conjunto de piezas o elementos que sirve como soporte rígido de una cosa. c. Componente principal de los cuerpos, susceptible de toda clase de formas y de sufrir cambios, que se caracteriza por un conjunto de propiedades físicas o químicas, perceptibles a través de los sentidos.	a. Funcionalidad de los mecanismos. b. Soporte de los elementos. c. El material adecuado para la construcción.	Adimensional	Eficiencia Índice de desempeño	Softwares CAD/CAE
Calidad de la soldadura	Dependiente	Esfuerzo a la rotura.	Es la máxima tensión que un material puede soportar bajo tensión antes de que su sección transversal se contraiga de manera significativa.	Zona de soldadura	Pascales	Índice de Razón entre la resistencia de la soldadura con el material base	Máquina Universal para ensayos destructivos a tracción.
Parámetros de operación de la máquina	Interviniente	a. Frecuencia b. Amplitud c. Presión Axial.	a. Número de ciclos realizados en un segundo. b. Distancia desde un punto mínimo a un punto máximo en una oscilación. c. Presión perpendicular que une las superficies de contacto de materiales a soldar	a. Rotación del motor eléctrico. b. Recorrido de la corredera del mecanismo. c. Presión del mecanismo hidráulico en la sujeción de los materiales	a. Hercios b. Milímetros c. Pascales	Variación de parámetros de operación	Tacómetro Calibrador Manómetro Software de simulación
Temperatura de vitrificación.	Interviniente	a. Coeficiente fricción. b. Temperatura	a. Coeficiente de fricción vincula la oposición al deslizamiento que ofrecen las superficies de dos cuerpos en contacto según la intensidad del apoyo mutuo que experimentan. b. Grado o nivel térmico de un cuerpo.	a. Material base a soldar. b. Zona de soldadura	a. Adimensional b. Grados Celsius	Variación	a. Tribómetro b. Termómetro.

**Realizado por:** Toasa Jimes, Rodrigo Patricio, 2021

### 3.3 MATRIZ DE CONSISTENCIA

**Tabla 2-3.** Tabla de matriz de consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	Variable y sub-variables	Indicadores	Metodología Técnica e instrumentos	Instrumentos de recolección de datos
<b>Problema General</b>	<b>Objetivo General</b>	<b>Hipótesis General</b>				
¿Cómo realizar el diseño y construcción de una máquina para soldadura de termoplásticos mediante la soldadura por fricción para unir acrílico?	Diseñar y construir un prototipo de máquina, para realizar la unión de materiales termoplásticos como el acrílico mediante la soldadura por fricción lineal.	¿El diseño y la construcción de la máquina de soldadura por fricción lineal si permitirá unir materiales hechos en acrílico?	<b>Variable Independiente</b> Parámetros de operación de la máquina	Funcionalidad de los mecanismos de la máquina.	<b>Tipo de investigación</b> Aplicativa <b>Método</b> Deductivo <b>Diseño de la investigación</b> Se da en dos etapas: el diseño y la construcción. <b>Población</b> No existe <b>Muestra</b> No existe	Softwares CAD/CAE Laboratorio de resistencia de materiales para ensayos destructivos. Tacómetro Calibrador Manómetro Tribómetro Termómetro.
			<b>Variable dependiente</b> Calidad en la unión de materiales termoplásticos	Zona de soldadura.		
<b>Problemas Específicos</b>	<b>Objetivos específicos</b>		<b>Variable Interviniente</b>		<b>Indicador</b>	<b>Instrumentos de recolección de datos</b>
1. ¿Cómo se comporta la fuerza de rozamiento en este tipo de máquina?	1. Realizar análisis sobre la fuerza de rozamiento de materiales hechos en acrílicos		Coeficiente de rozamiento		Material base a unir	Investigación

<p>2. ¿Cuáles son las magnitudes y parámetros de funcionamiento para realizar la soldadura por fricción lineal?</p>	<p>2. Determinar los parámetros de funcionamiento que se requerirá para realizar la soldadura por fricción lineal de materiales hechos en acrílico.</p>	<p>Parámetros de operación de la máquina</p>	<p>a. Rotación del motor eléctrico. b. Recorrido de la corredera del mecanismo. c. Presión del mecanismo hidráulico en la sujeción de los materiales</p>	<p>Cronómetro Calibrador Manómetro</p>
<p>3. ¿Cómo generar el movimiento que realizará la máquina?</p>	<p>3. Seleccionar y dimensionar los mecanismos que se aplicarán en el diseño de máquina.</p>	<p>Parámetros de operación de la máquina</p>	<p>Modelo CAD de: Rotación del motor eléctrico, Recorrido de la corredera del mecanismo, Presión del mecanismo hidráulico en la sujeción de los materiales</p>	<p>Software de simulación</p>
<p>4. ¿Cuál es la calidad de la soldadura que se obtendrá con ésta máquina?</p>	<p>4. Evaluar la calidad de soldadura realizada por el prototipo de la máquina, mediante ensayos de resistencia a la tracción, y compararlos con la resistencia del material base.</p>	<p>Resistencia mecánica</p>	<p>Zona de soldadura</p>	<p>Ensayos de resistencia de materiales</p>

**Realizado por:** Toasa Jimes, Rodrigo Patricio, 2021



### **3.4 Metodología de la investigación**

#### **3.4.1 Tipo y diseño de la investigación**

El tipo de investigación que se pretende realizar es la investigación aplicada, ya que, según Borja, M., (2012): “la investigación aplicada busca conocer, actuar, construir y modificar una realidad problemática”.

La investigación se dará en dos momentos: Diseño y la construcción.

#### **Diseño:**

- Investigación bibliográfica: Revisión de investigaciones anteriores similares a la que se va a desarrollar, en el cual se revisará los parámetros de funcionamiento de las máquinas de soldadura por fricción lineal que se utilizaron (variable independiente). Esta información se utilizará como referencia inicial para el diseño de la máquina. Además, se revisará el comportamiento de la fuerza de rozamiento, ésta magnitud es importante estudiarla para el análisis dinámico que se realizará en el mecanismo que conformará la máquina.
- Se analizarán los mecanismos que cumplan las especificaciones que se debe cumplir la máquina, se seleccionarán y dimensionarán mediante análisis cinemáticos y dinámicos, que se comprobarán mediante software de simulación, para el cual será necesario desarrollar un modelo CAD.

#### **Construcción:**

- Seleccionar materiales de acuerdo al diseño.
- Se realizará la construcción de la máquina con los elementos desarrollados anteriormente, en este paso se obtendrán elementos predeterminados que se pueden encontrar en el mercado nacional y otros elementos que deben ser fabricados, que posteriormente serán ensamblados.
- Verificación y operación: Una vez realizada la construcción se realizarán las primeras operaciones de soldadura y es donde se verificará el funcionamiento de la máquina. Al determinar que la máquina opera correctamente, aquí es donde se manipularán los parámetros de operación de la máquina y se determinará su influencia en la calidad de soldadura de los elementos. Mediante la manipulación de los parámetros se procederá a determinar cuáles son las magnitudes de los parámetros de operación correctos para poder hacer una soldadura por fricción de manera óptima.

- Mediciones y análisis de resultados: Se realizarán operaciones de soldadura de distintas probetas, las cuales serán llevadas al laboratorio para realizar ensayos de tracción (variable dependiente) y compararla con la resistencia que tiene el material base. También se harán ensayos de resistencia de probetas que estén unidas con otros procedimientos de unión de materiales hechos en acrílico, y se compararán con la soldadura por fricción. Además, en este último paso, se determinará la eficiencia mecánica del prototipo.

#### **3.4.2 Métodos de investigación**

El método a usar en la investigación es el método deductivo

#### **3.4.3 Enfoque de la investigación:**

Método cuantitativo y cualitativo: Debido a que ambos emplean procesos cuidadosos, metódicos y empíricos en su esfuerzo para generar conocimiento. Ambos enfoques llevan a cabo la observación y evaluación de fenómenos, por medio de la recolección de datos para luego ser analizados e interpretados. Permiten un mayor nivel de control e inferencia que otros tipos de investigación, siendo posible realizar experimentos y obtener explicaciones contrastadas a partir de hipótesis. Los resultados de estas investigaciones se basan en la estadística y son generalizables. (Borja, M., 2012)

#### **3.4.4 Alcance de la investigación:**

El alcance de la investigación es correlacional, ya que se pretende saber cómo se comporta la variable dependiente conociendo el comportamiento de la variable independiente.

#### **3.4.5 Población de estudio:**

Por ser una investigación aplicada de diseño y construcción de una máquina, no existe una población de estudio.

#### **3.4.6 Unidad de análisis:**

El prototipo de máquina construida mediante la evaluación de la calidad de la soldadura que se pueda obtener al realizar la unión de materiales hechos en acrílico.

#### **3.4.7 Selección de muestra**

Al realizar el diseño y construcción de una máquina no existe una muestra de estudio.

#### **3.4.8 Tamaño de la muestra**

Al realizar el diseño y construcción de una máquina no existe un tamaño de muestra.

### 3.4.9 *Técnica de recolección de datos primarios y secundarios*

- Registros de datos de investigaciones previas
- Instrumentos de medición
- Modelos simulados
- Construcción de la máquina de soldadura

### 3.4.10 *Instrumentos para procesar datos recopilados*

Utilización de software CAD/CAE Inventor y Abaqus con Licencia estudiantil, software ADAMS y Microsoft Excel.

## 3.5 **Diseño y construcción del prototipo de máquina para soldadura por fricción lineal de acrílico.**

### 3.5.1 *Introducción*

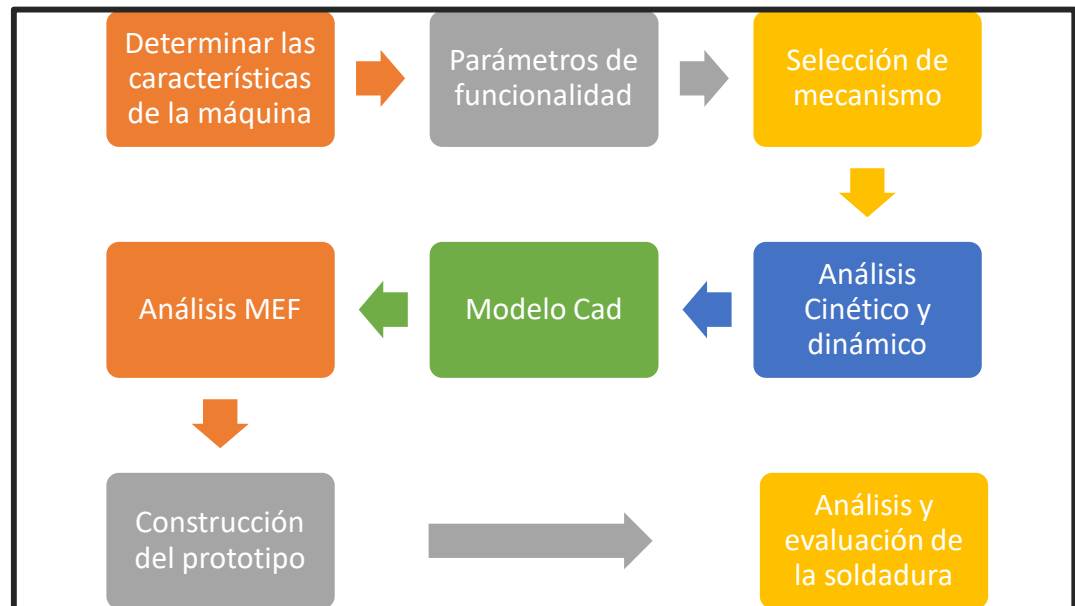
El diseño de la presente investigación se da lugar debido a la necesidad que existe en las diferentes áreas industria nacional, de unir elementos termoplásticos, como el acrílico (PMMA) para distintos propósitos, ya sean estructurales o decorativos, algunos ejemplos se pueden observar en la figura 1-3.



**Figura 1-3.** Aplicaciones del acrílico

Fuente: <http://www.crilglas.com/usos-industria.html>

El desarrollo del prototipo de la máquina se los realizó en varias etapas, de las cuales se puede observar en la figura 2-3 y se revisarán a continuación.



**Figura 2-3.** Proceso de diseño y construcción de la máquina

**Realizado por:** Toasa Jimes, Rodrigo Patricio, 2021

### 3.5.2 Características de la máquina

El objetivo principal de la presente investigación es diseñar y construir un prototipo de máquina de soldadura por fricción lineal para soldar materiales hechos en acrílico. Por lo cual es necesario determinar las características del sistema mecánico que va a conformar la máquina, para ello es necesario revisar las características de máquinas similares existentes. En el capítulo 2 se hizo una breve revisión de las características de los equipos de soldadura por fricción lineal, estas máquinas tienen tres sistemas principales que los conforman, los cuales son: un conjunto vibrador, una mesa elevadora y herramientas de sujeción.

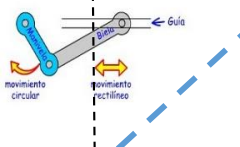
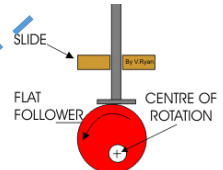



El conjunto vibrador es un mecanismo que genera el movimiento lineal alternativo durante el proceso de soldadura, este mecanismo es accionado neumáticamente o mediante electro magnetos, para esta investigación se recurrirá a utilizar un sistema electromecánico para generar la vibración, es decir; se utilizará un motor eléctrico para generar el movimiento circular y se seleccionará un mecanismo que lo transforme en movimiento lineal. Se utilizará este sistema por su bajo coste en comparación a los sistemas utilizados en las máquinas industriales existentes en el mercado internacional.

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 se puede realizar de muchas maneras, pero 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 a soldadura.

Cada parte de la máquina se puede diseñar y construir de varias formas, por tanto, en la siguiente tabla se presenta una tabla Morfológica (tabla 3-3), donde se descompone a la funcionalidad de la máquina en varias subfunciones y cada una de ellas tendrá varios conceptos que aportarán ideas para el diseño final de la máquina.

**Tabla 3-3.** Tabla morfológica del concepto de la máquina

<b>Producto:</b>	<b>Prototipo de Máquina de soldadura por fricción lineal</b>			
<b>Subfunciones</b>	<b>Concepto 1</b>	<b>Concepto 2</b>	<b>Concepto 3</b>	<b>Concepto 4</b>
<i>Generación de movimiento</i>	Motor eléctrico CA (movimiento Circular)	Motor hidráulico (movimiento Circular ó lineal)	Electroimanes (movimiento lineal)	
<i>Mesa vibradora. (Transformación de movimiento circular a lineal).</i>	Mecanismo Biela-Manivela-Corredera 	Mecanismo Leva circular excéntrica 		
<i>Mesa elevadora</i>	Cilindro Hidráulico	Cilindro Neumático	Mecanismo de tornillo	Mecanismo de palanca.
<i>Herramienta de sujeción</i>	Mordaza 	Sargentos o gatos 	Pinzas 	

Realizado por: Toasa Jimes, Rodrigo Patricio, 2021

Esta tabla morfológica indica que se puede concebir hasta 72 formas de diseñar la máquina, por las distintas combinaciones de los conceptos obtenidos en las subfunciones (3x2x4x3), pero las combinaciones que se tomarán en cuenta son las que están relacionadas mediante las líneas de colores segmentadas, debido a que en la primera sub-función se considerará utilizar un motor eléctrico de corriente alterna por ser, los más fáciles de obtener además de que su precio es mucho

más bajo en comparación a las otras opciones, los mecanismos a emplear en la mesa vibradora son el mecanismo de biela manivela y la leva circular excéntrica, cualquiera de las 2 opciones pueden ser aplicadas, pero la elección se deberá hacer mediante un análisis cinemático y dinámico que indique cual será el adecuado de aplicar, para la mesa elevadora existen 4 conceptos, pero se elegirá utilizar un cilindro hidráulico, ya que se requiere medir la presión que se está aplicando durante el proceso de soldadura y esto será difícilmente posible con las opciones mecánicas, otro aspecto importante de esta elección, es que la generación de la fuerza hidráulica se puede realizar mediante un sistema de bombeo pequeño y manual, a diferencia del neumático donde se requiere que se implemente un sistema de generación de presión mediante compresores de aire.

Las herramientas de sujeción que se implementarán son las mordazas o los sargentos, la elección que uno de ellos dependerá las primeras pruebas que se realicen una vez obtenida la máquina, se revisará cuál de ellas, se puede adaptar fácilmente a la máquina y que ofrezca la mejor sujeción.

### ***3.5.3 Parámetros de la máquina para la soldadura de termoplásticos***

Los parámetros de soldadura principales que afectan directamente el proceso de soldadura son los siguientes: Frecuencia de oscilación, amplitud de movimiento y presión de contacto.

En el libro “Handbook of Plastics Joining” de Michael Troughton (2008), indica que la mayoría de equipos de soldadura por fricción lineal, operan con frecuencias de oscilación de soldadura de 100 – 260 Hz, de aquí se dividen en máquinas de alta frecuencia con frecuencias entre 180 – 260 Hz, y de baja frecuencia entre 100 – 135 Hz, estas máquinas pueden ser de frecuencia variable o fija.

Las amplitudes de oscilación en la soldadura de estas máquinas se encuentran entre 0.7 – 1.8 mm para bajas amplitudes, éstas se usan con altas frecuencias; y 2 – 4 mm para altas amplitudes y se utilizan con frecuencias altas.

Las presiones de soldadura para plásticos varían entre 0.5 – 20 MPa, las presiones elevadas disminuyen el tiempo de soldadura, sin embargo, hay que tener cuidado con las presiones elevadas ya que pueden desplazar la zona viscosa de material de la zona de unión haciendo que no se realice una soldadura efectiva.

Un parámetro que también es importante, pero principalmente depende del propósito de la soldadura, es el tiempo total del proceso de unión, según Michael Troughton (2008), éste tiempo varía entre 6 a 15 segundos.

Todo lo visto sobre los parámetros de funcionamiento para el diseño de la máquina, se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 4-3.** Parámetros de funcionamiento de las máquinas de soldadura por fricción lineal.

Parámetros	Alta frecuencia	Baja frecuencia
Frecuencia de oscilación	180 – 260 Hz	100 – 135 Hz
Amplitud de movimiento	0.7 – 1.8 mm	2 – 4 mm
Presión	0.5 – 20 MPa	0.5 – 20 MPa
Tiempo	6 – 15 segundos	6 – 15 segundos

Fuente: Handbook of plastics joining: a practical guide. Troughton (2008)

Realizado por: Toasa Jimes, Rodrigo Patricio, 2021

### 3.5.4 Simulación y selección de parámetros de soldadura para el acrílico (Polimetilmetacrilato PMMA)

Para poder determinar los parámetros de soldadura, se realizarán simulaciones de soldadura por fricción lineal en software CAE, donde es importante tener presente las propiedades mecánicas y térmicas del acrílico. Estas propiedades se pueden observar en el gráfico 3-3.

Para las simulaciones se requiere elegir los parámetros de funcionamiento de la máquina insertarlos en el software CAE, y observar si la temperatura que se alcanza en los modelos es la adecuada para poder realizar la soldadura por fricción.

Como se vio en el capítulo II la temperatura que se debe alcanzar para poder realizar una buena soldadura es la temperatura de vitrificación  $T_g$ , para que el material no llegue a ser totalmente líquido sino más bien pastoso y sufra una deformación sin cambiar sus propiedades. El valor de esta temperatura según lo visto en la figura 3-3 varía desde aproximadamente 85°C a 165°C. Al tratar de superar este rango de temperatura conllevará a la fundición del material en la zona de fricción y esto producirá soldaduras deficientes, porque, el material fundido saldría expulsado de la zona de unión debido a la presión ejercida.

Polímero PMMA o Acrílico (Polimetacrilato, o metacrilato de polimetilo)			
Layout: Edu Nivel 2		Show/Hide	
<b>Propiedades mecánicas</b>			
Modulo de Young	2.24	- 3.8	GPa
Modulo a cortante	0.803	- 1.37	GPa
Módulo en volumen	4.2	- 4.4	GPa
Coefficiente de Poisson	0.384	- 0.403	
Límite elástico	53.8	- 72.4	MPa
Resistencia a tracción	48.3	- 79.6	MPa
Resistencia a compresión	72.4	- 131	MPa
Elongación	2	- 10	% strain
Dureza-Vickers	16.1	- 21.9	HV
Resistencia a fatiga para $10^7$ ciclos	* 15.2	- 32.7	MPa
Tenacidad a fractura	0.7	- 1.6	MPa.m <sup>0.5</sup>
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	* 0.0105	- 0.0179	
<b>Propiedades térmicas</b>			
Temperatura de vitificación	84.9	- 165	°C
Máxima temperatura en servicio	41.9	- 56.9	°C
Mínima temperatura en servicio	-123	- -73.2	°C
¿Conductor térmico o aislante?	Buen aislante		
Conductividad térmica	0.0837	- 0.251	W/m.°C
Calor específico	1.49e3	- 1.61e3	J/kg.°C
Coefficiente de expansión térmica	72	- 162	µstrain/°C

**Figura 3-3.** Propiedades mecánicas y térmicas del PMMA

Fuente: Software CES EduPack 2003

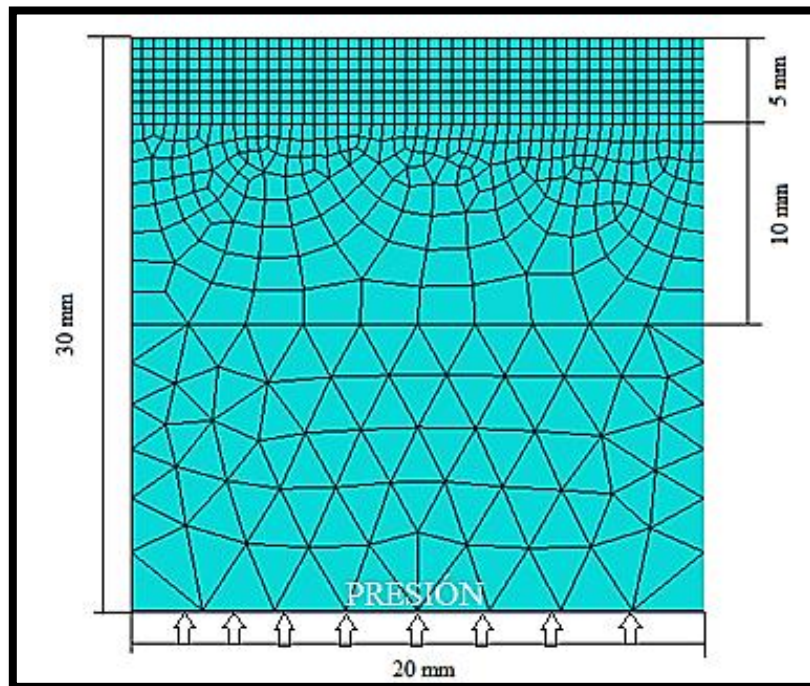
Para las simulaciones se consideró que se va a construir una máquina de baja frecuencia, porque, los motores eléctricos de altas potencias que se pueden obtener en el país, trabajan a bajas frecuencias en comparación a lo que se requiere para una máquina de soldadura por fricción lineal de alta frecuencia. Estos parámetros para máquinas de baja frecuencia están descritos en la tabla 4-3.

Para las simulaciones en el software CAE mediante elementos finitos, se realizó el modelado y mallado de 2 piezas de acrílico que se pretende unir, en las siguientes figuras se observan sus medidas y su mallado. Para reducir el coste computacional se realizaron modelos simplificados en 2D, con un análisis dinámico explícito térmico aplicado a un caso de esfuerzo plano, debido a que los materiales que se pretende soldar son placas de acrílico, donde su espesor es relativamente pequeño en comparación al resto de dimensiones.

En la figura 4-3 se observan las medidas de la pieza de acrílico que se quiere unir, el cual tiene particiones 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, se usó esta forma de mallado, debido a que en la investigación de (Li et al., 2010), se aplicó este mismo tipo de mallado pero con elementos más pequeños.

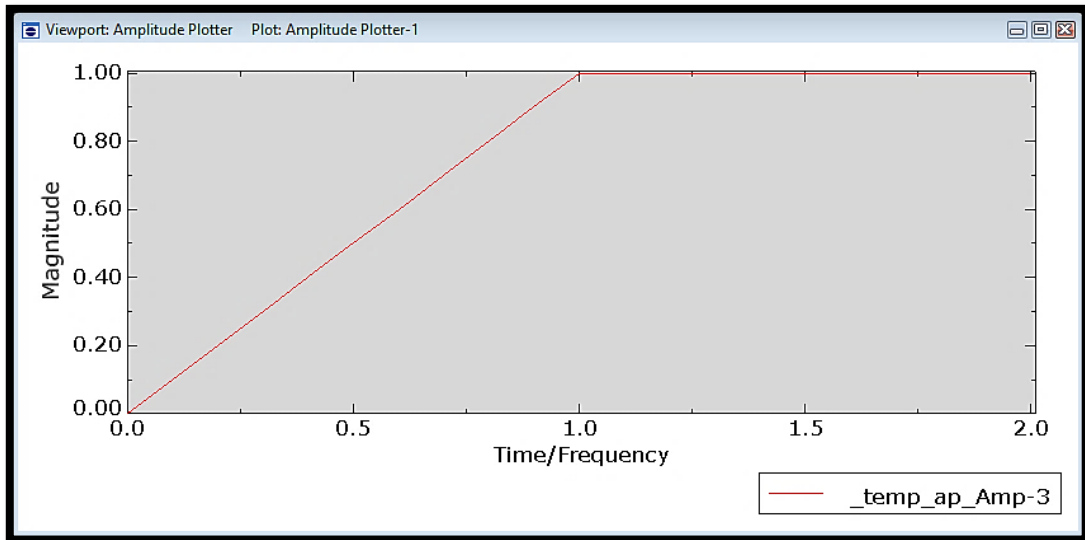


**Figura 4-3.** Placa inferior de acrílico con mallado de elementos triangulares y cuadráticos combinados.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En la placa que se observa en la figura 4-3, tiene restricciones de movimientos en el eje x y en el eje z, por tanto, es libre de moverse en el eje y (eje vertical) debido a la presión que se ejerce para crear el contacto con la otra pieza de acrílico.

La forma en la que se aplica la presión durante las simulaciones se representa en la siguiente gráfica, donde se observa que se inicia con una presión igual a 0 en el tiempo inicial y se aumenta linealmente hasta el primer segundo, luego de esto la presión se mantiene constante.

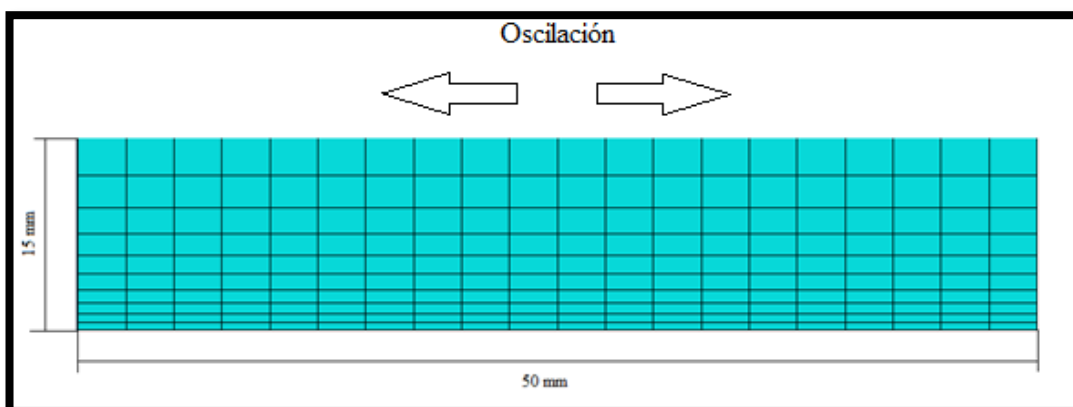


**Figura 5-3.** Forma de aplicación de la presión durante las simulaciones en el software CAE

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

La otra pieza de acrílico que interviene en la unión se observa en la figura siguiente, en éste se tiene un mallado menos preciso en comparación al anterior, esto se hizo para tener una reducción en la carga computacional, se malló con 231 nodos y 200 elementos cuadriculados. Éste elemento está restringido su movimiento en el eje y (vertical) y el eje z; por lo tanto, sólo se moverá en el eje x (eje horizontal), éste movimiento lo proporciona la mesa vibradora de la máquina, por lo que se debe generar una oscilación y amplitud determinada por el tipo de la máquina.

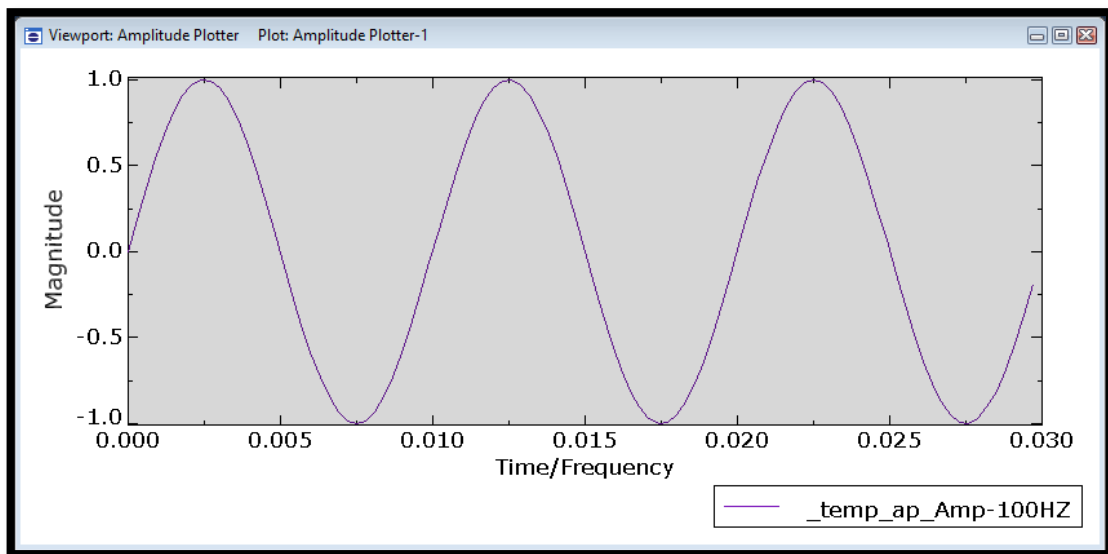
Estas oscilación y amplitud están relacionadas mediante la ecuación 1, con la cual se puede estimar una velocidad media que haga posible la soldadura, esta velocidad debe estar entre 500 m/s a 1000 m/s.



**Figura 6-3.** Pieza móvil de acrílico

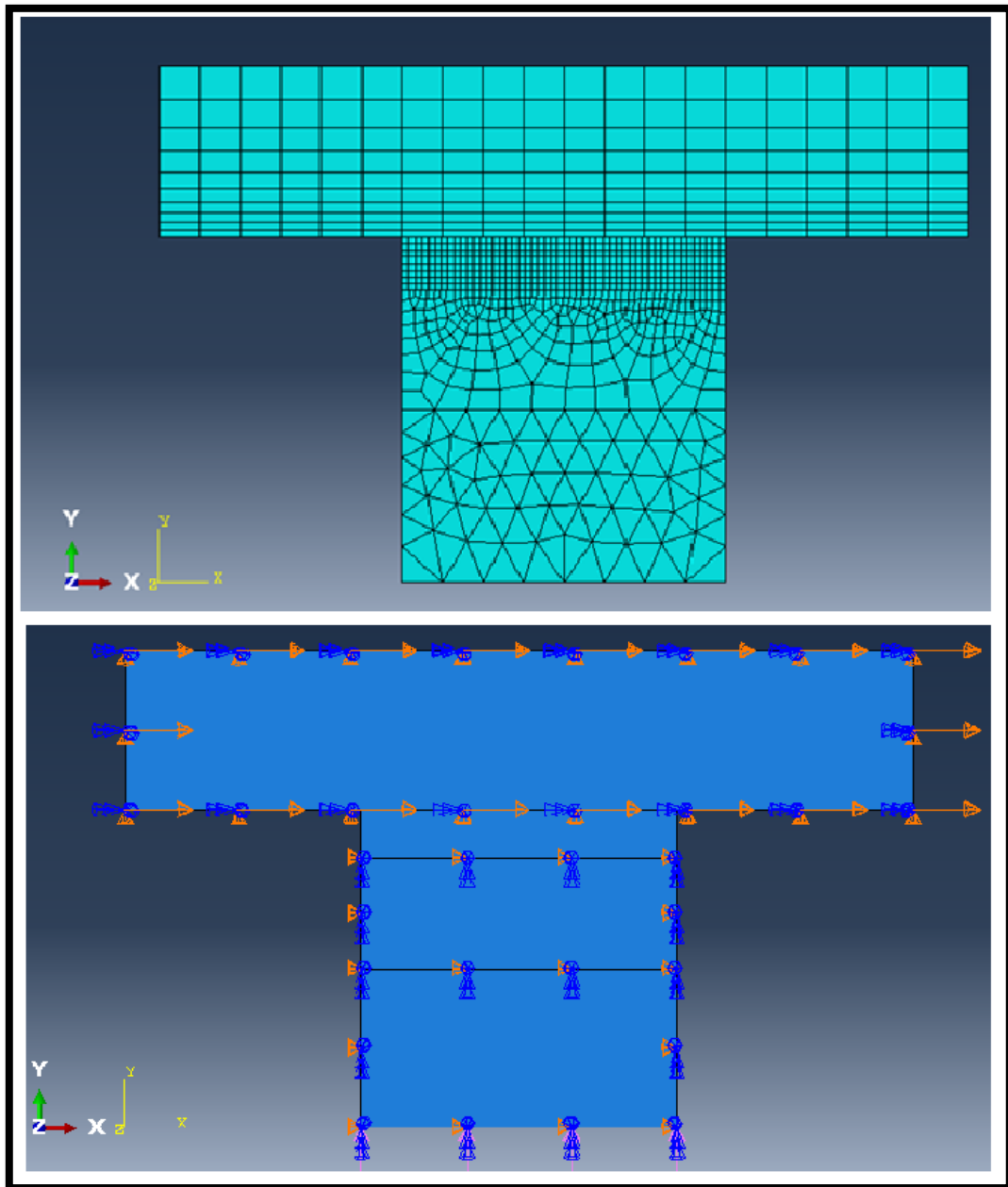
**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

El movimiento en la oscilación debe ser de forma sinusoidal, como se observa en la figura 7-3, esto lo indican muchos autores de investigaciones sobre la soldadura por fricción lineal, para obtener mejores resultados.



**Figura 7-3.** Comportamiento del movimiento en la soldadura por fricción lineal

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.



**Figura 8-3.** Ensamblaje y mallado de los elementos en el software CAE (Arriba). Ensamblaje y restricciones de los elementos en el software CAE (Abajo)

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En la figura anterior se tiene una vista de ensamblaje de las placas de acrílico a unir con su mallado en la figura superior, mientras que, en la figura inferior se observa el ensamblaje con las restricciones de movimiento en el ambiente del software CAE.

Se consideró el modelo de Coulomb para representar a la fricción en los modelos CAE, éste modelo es el más utilizado por muchos autores de investigaciones sobre la soldadura por fricción lineal, como se vio anteriormente el acrílico es un termoplástico con un elevado coeficiente de

fricción sus valores varían desde 0.2 a 0.8, dependiendo del tipo de acrílico (si es nuevo o envejecido), es por esta razón que se tomó un valor promedio de este rango, se ingresó el valor de  $\mu=0.5$  para el coeficiente de fricción en el software.

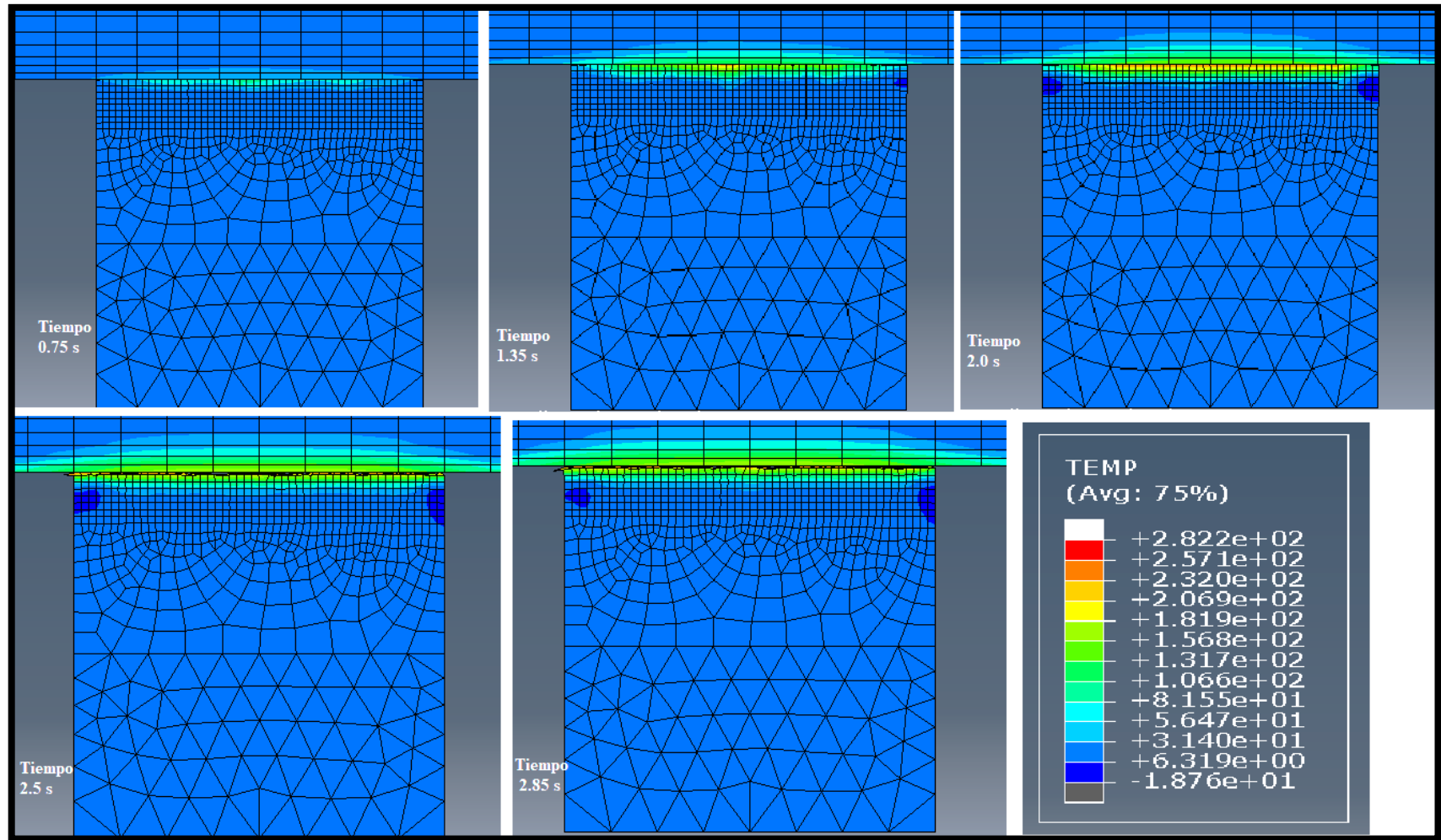
Luego de varias simulaciones con combinaciones de frecuencia de oscilación, amplitud de oscilación y presión de contacto entre las piezas a unir, se obtuvieron los siguientes parámetros de funcionamiento indicados en la tabla 5-3, que hacen que se llegue a la temperatura de vitrificación e incluso de fundición en un tiempo menor a 3 segundos, ya que (Troughton, 2008) indica que típicamente el tiempo de soldadura es de 1 a 3 segundos.

**Tabla 5-3.** Parámetros de soldadura

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
<b>Frecuencia</b>	100 Hz
<b>Amplitud</b>	4 mm
<b>Presión</b>	0 – 1 MPa.

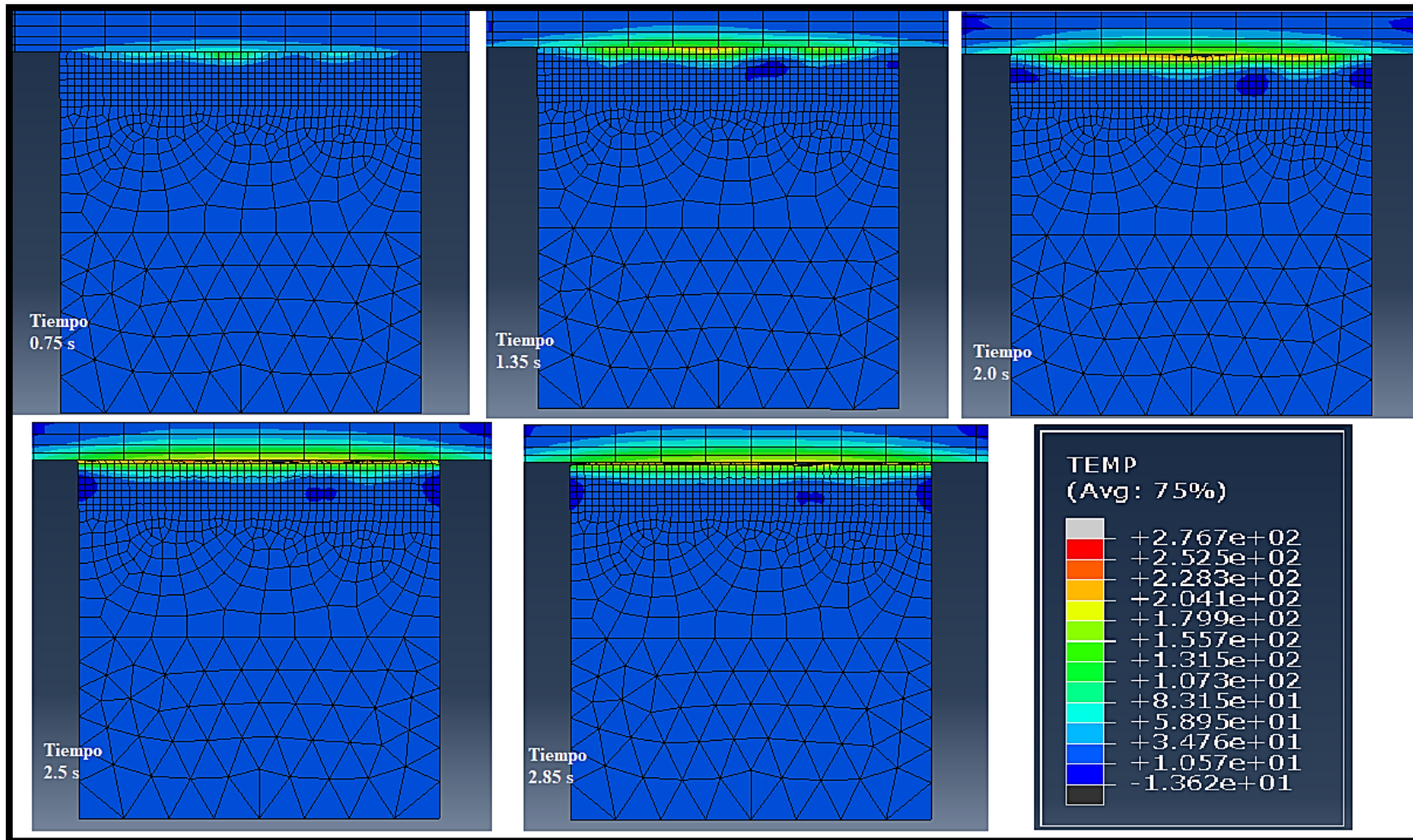
**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Estos valores se aplicaron para obtener los siguientes resultados de temperatura indicados en las siguientes figuras, se utilizó un valor inicial de 15°C de temperatura del material. Se utilizaron 3 diferentes espesores de las placas de acrílico, para 2, 5 y 10 mm de espesor respectivamente, como se observan en las figuras siguientes.



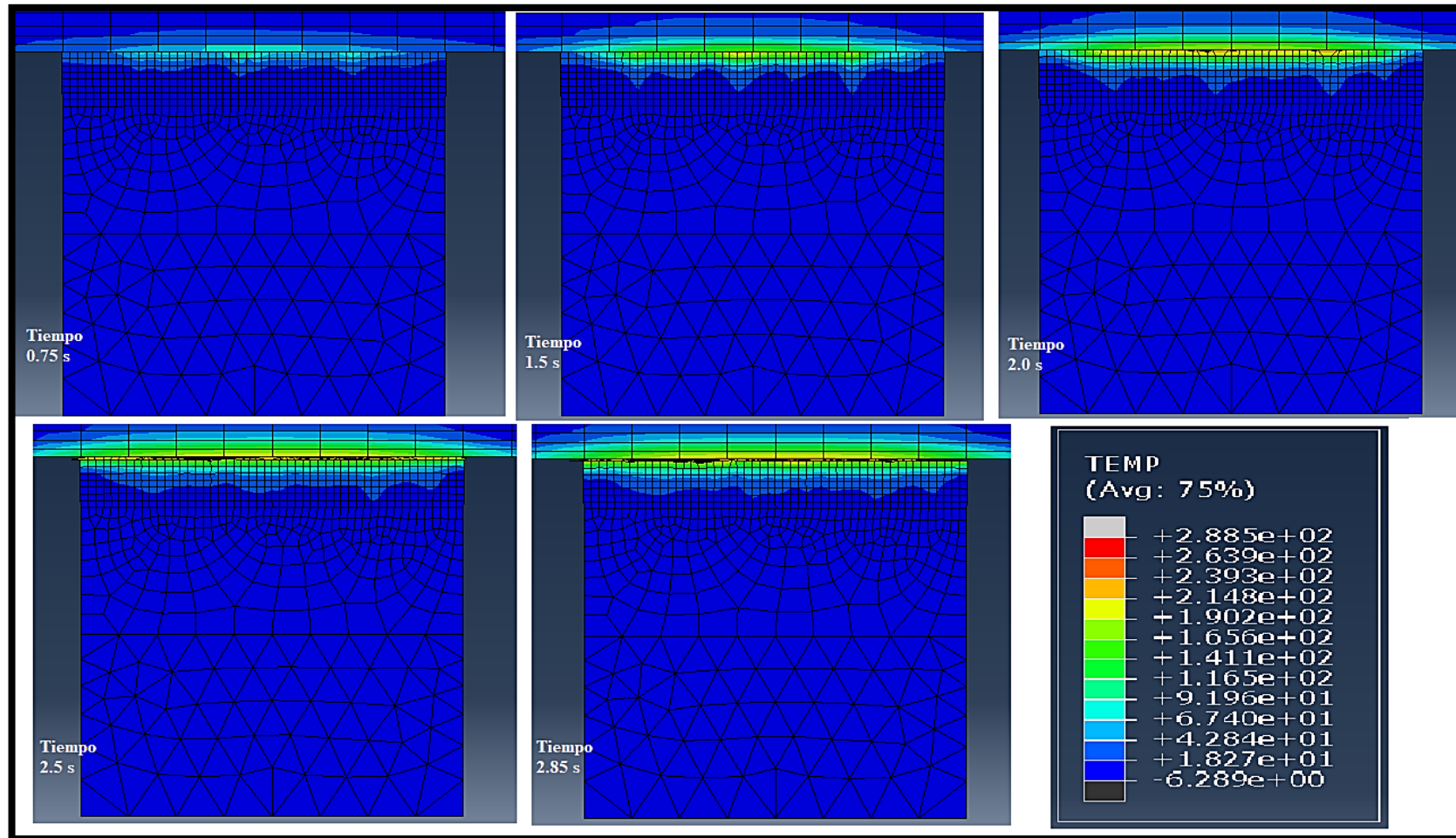
**Figura 9-3.** Resultados de temperatura en los elementos del mallado de placas de 2 mm de espesor en simulación con software CAE de elementos finitos.

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.



**Figura 10-3.** Resultados de temperatura en los elementos del mallado de placas de 5 mm de espesor en simulación con software CAE de elementos finitos.

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.



**Figura 11-3.** Resultados de temperatura en los elementos del mallado de placas de 10 mm de espesor en simulación con software CAE de elementos finitos.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.



La frecuencia y amplitud de oscilación durante las simulaciones son óptimas para la soldadura por fricción lineal, ya que usando la ecuación 1 para determinar la velocidad media en la soldadura en estas simulaciones es:

$$v = 2\alpha f = 2(4mm)(100Hz) = 800mm/s$$

Por tanto, se puede comprobar en las simulaciones que estos valores en los parámetros de soldadura son ideales para obtener una buena soldadura por fricción lineal, en los gráficos anteriores, se puede observar que con estos valores y con una presión de 1MPa se puede llegar a la temperatura de vitrificación que varía según el tipo de acrílico (nuevo o envejecido) e incluso en zonas de la unión existen temperaturas que superan la temperatura de fusión del material que esta alrededor de 165°C en menos de 3 segundos, en los 3 diferentes espesores de 2, 5 y 10mm.

Se puede observar en los resultados de las simulaciones que los valores más altos de temperatura se encuentran en la parte central de la zona de soldadura, esto puede resultar ventajoso ya que en la parte central puede existir una mejor unión, además como se esperaba existe una delgada capa de material fundido entre las superficies que empieza fluir y salir por los extremos.

Como se revisó en el capítulo 2 la presión que se ejerce entre las piezas a unir tiene el efecto de reducir o aumentar los tiempos en las fases de soldadura (fases I a III), si se usan valores de presión bajos el tiempo aumentará y si se usan presiones altas (dentro del rango de presión para soldaduras de termoplásticos) el tiempo se reducirá.

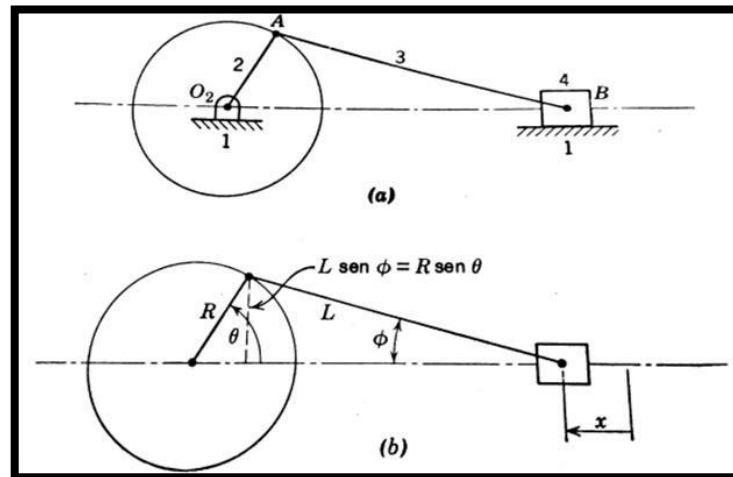
### ***3.5.5 Selección del mecanismo de la mesa vibradora***

Para el diseño del mecanismo de la mesa, se consideraron 2 tipos de mecanismos de transformación de movimiento circular a lineal, los cuales son: el mecanismo biela manivela y leva circular excéntrica, los cuales se describen a continuación.

#### ***3.5.5.1 Mecanismo de biela-manivela-corredera***

Este mecanismo es muy utilizado en la industria y su mayor aplicación se encuentra en motores de combustión interna y en compresión de gases. En la figura 12-3 se muestra un dibujo en que el eslabón 1 es el marco (que se considera fijo), el eslabón 2 es la manivela, el eslabón 3 es la biela y el eslabón 4 el pistón. En los compresores, un motor eléctrico le ejerce un par a la manivela, que a su vez le transmite esta fuerza por medio de la biela al pistón. Se puede ver que hay dos

puntos muertos durante el ciclo, uno a cada posición extrema del recorrido del pistón. Con el propósito de vencerlos, es necesario fijar un volante a la manivela de manera que se puedan pasar los puntos muertos con ayuda de la inercia. Este mecanismo también se emplea en los motores de combustión interna en que la fuerza se aplica sobre el pistón y a través de la biela se le transmite el par a un cigüeñal. (Mabie & Ocvirk, 1978)



**Figura 12-3.** Diagrama cinemático del mecanismo biela-manivela-corredera

Fuente: MABIE, H.; OCVIRK, F. (1978). Mecanismos y Dinámica de Maquinaria.

Las ecuaciones para el desplazamiento, velocidad y aceleración se obtienen empleando la figura 12-3b.

$$x = R + L - R \cos \theta - L \cos \phi$$

$$x = R(1 - \cos \theta) + L(1 - \cos \phi)$$

$$x = R(1 - \cos \theta) + L \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{R}{L}\right)^2 \sin^2 \theta} \right] \quad \text{(Ecuación 8)}$$

De la ecuación 8 la expresión dentro del radical, se puede aproximar mediante series binomiales. Quedando:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{R}{L}\right)^2 \sin^2 \theta} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L}\right)^2 \sin^2 \theta$$

Por lo tanto, la expresión que determine el movimiento de la corredera para el mecanismo biela-manivela-corredera es la siguiente:

$$x = R(1 - \cos \theta) + \frac{R^2}{2L} \sin^2 \theta \quad (\text{Ecuación 9})$$

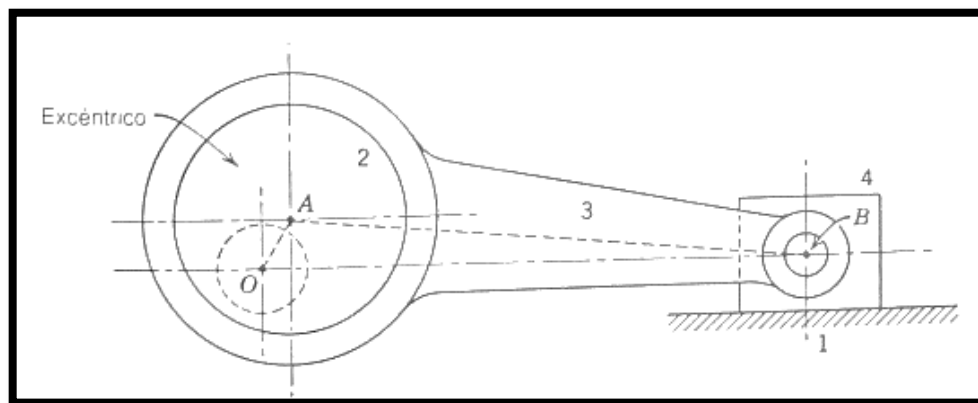
Las ecuaciones para la velocidad y aceleración de la corredera son:

$$v = \frac{dx}{dt} = R\omega \left[ \sin \theta + \frac{R}{2L} \sin 2\theta \right] \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = R\omega^2 \left[ \cos \theta + \frac{R}{L} \cos 2\theta \right] \quad (\text{Ecuación 11})$$

Dónde  $\theta = \omega t$ ; debido a que  $\omega$  (velocidad angular del motor) es constante.

Una variante del mecanismo biela-manivela-corredera (fig.13-3), se puede obtener aumentando el tamaño del perno de la manivela hasta que sea mayor que la flecha a la que está unida, y a la vez, desplazando el centro del perno de la manivela de la flecha. Este perno agrandado de la manivela se denomina excéntrico y el punto O el centro de la flecha. El movimiento de este mecanismo con la longitud equivalente OA de la manivela es idéntico al de la biela-manivela-corredera. Sin embargo, una seria desventaja de este mecanismo es el problema de la lubricación adecuada entre el excéntrico y la biela, lo cual limita la cantidad de potencia que se puede transmitir. (Mabie & Ocvirk, 1978)



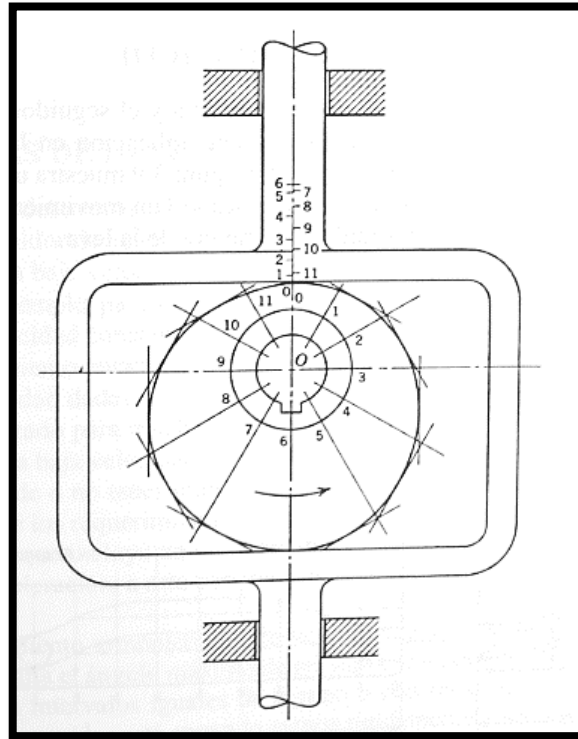
**Figura 13-3.** Variación de biela-manivela-corredera

Fuente: MABIE, H.; OCVIRK, F. (1978). Mecanismos y Dinámica de Maquinaria.

### 3.5.5.2 Leva circular excéntrica con seguidor de cara plana

Cuando se tiene una leva de disco y seguidor radial, con frecuencia es necesario hacer que el seguidor regrese en forma positiva y no por acción de la gravedad o de un resorte. En la figura 3-

14, se muestra una leva de este tipo en donde la leva controla de manera positiva el movimiento del seguidor, no solo durante el movimiento hacia afuera sino también en la carrera de retorno. Necesariamente, el movimiento de retorno debe ser igual que el movimiento hacia afuera, pero en dirección contraria. A esta leva también se le conoce como leva de anchura constante. (Mabie & Ocvirk, 1978)



**Figura 14-3.** Leva de ancho constante

Fuente: MABIE, H.; OCVIRK, F. (1978). Mecanismos y Dinámica de Maquinaria.

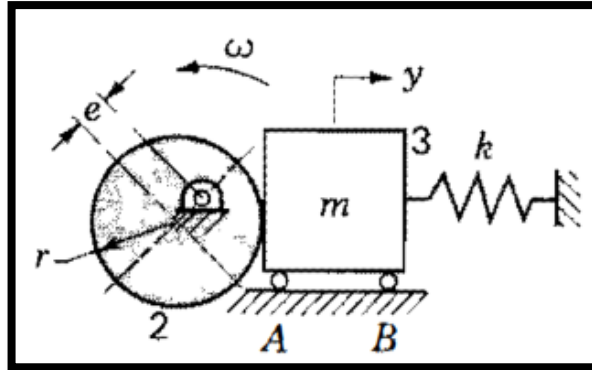
En la figura 15-3, se muestra un sistema sencillo de leva excéntrica y seguidor de movimiento alternativo que se compone de una leva de placa, una masa de seguidor de cara plana y un resorte de retención de rigidez  $k$ . La coordenada  $y$  designa el movimiento del seguidor en tanto la leva esté en contacto. Aquí se elige arbitrariamente el valor de  $y=0$ , en el punto inferior de la carrera. La distancia  $e$  entre el centro del disco y el centro del eje recibe el nombre de *excentricidad*. Luego las ecuaciones cinemáticas de interés son: (Shigley, 2001)

$$y = e - e \cos(\theta) \quad \text{(Ecuación 12)}$$

$$v = \frac{dy}{dt} = e\omega(\sin\theta) \quad \text{(Ecuación 13)}$$

$$a = \frac{d^2y}{dt^2} = e\omega^2(\cos\theta) \quad (\text{Ecuación 14})$$

Dónde  $\theta = \omega t$ ; debido a que  $\omega$  es constante.



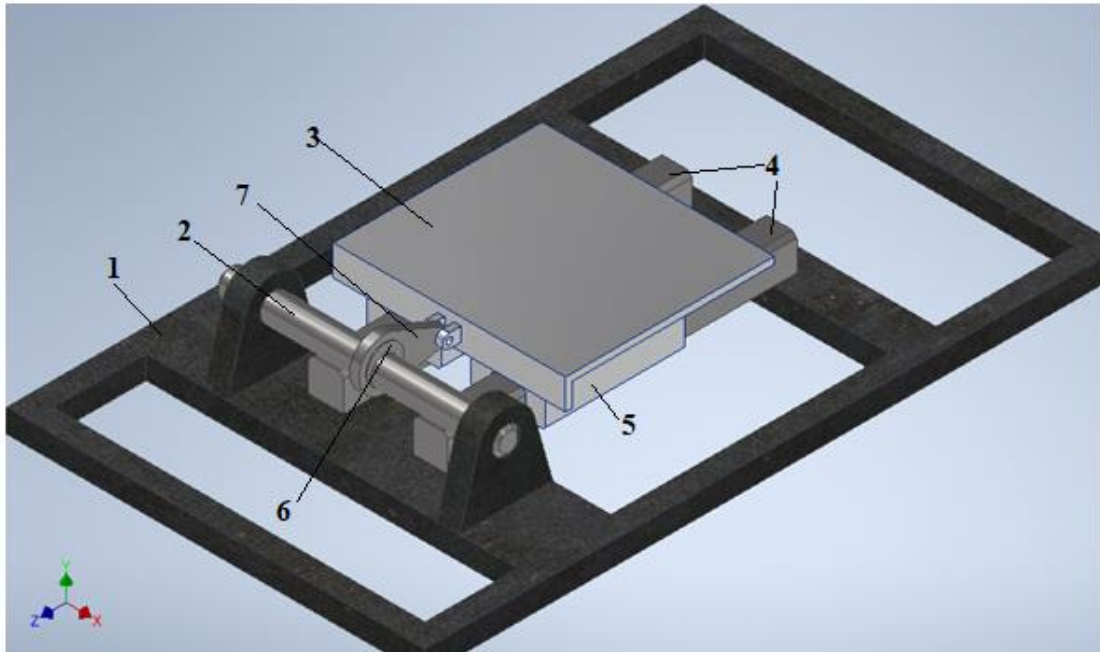
**Figura 15-3.** Modelo de leva excéntrica

**Fuente:** SHIGLEY, J. (2001). Teoría de máquinas y mecanismos.

### 3.5.6 *Análisis cinemático de los mecanismos*

Los mecanismos presentados anteriormente generan el movimiento que se necesita para la máquina propuesta en esta investigación, por lo que se requerirá dimensionar los elementos que la conformarán, y así realizar el análisis cinemático de posición, velocidad y aceleración de éstos mecanismos. Para esto se realizaron modelos CAD en el software de Autodesk Inventor 2020 (Licencia de estudiante) y se obtuvieron los gráficos de la cinemática de los mecanismos mediante el software Adams.

Los valores de los parámetros de funcionamiento que se usaron para el análisis cinemático son los que se indicaron en la tabla 5-3.



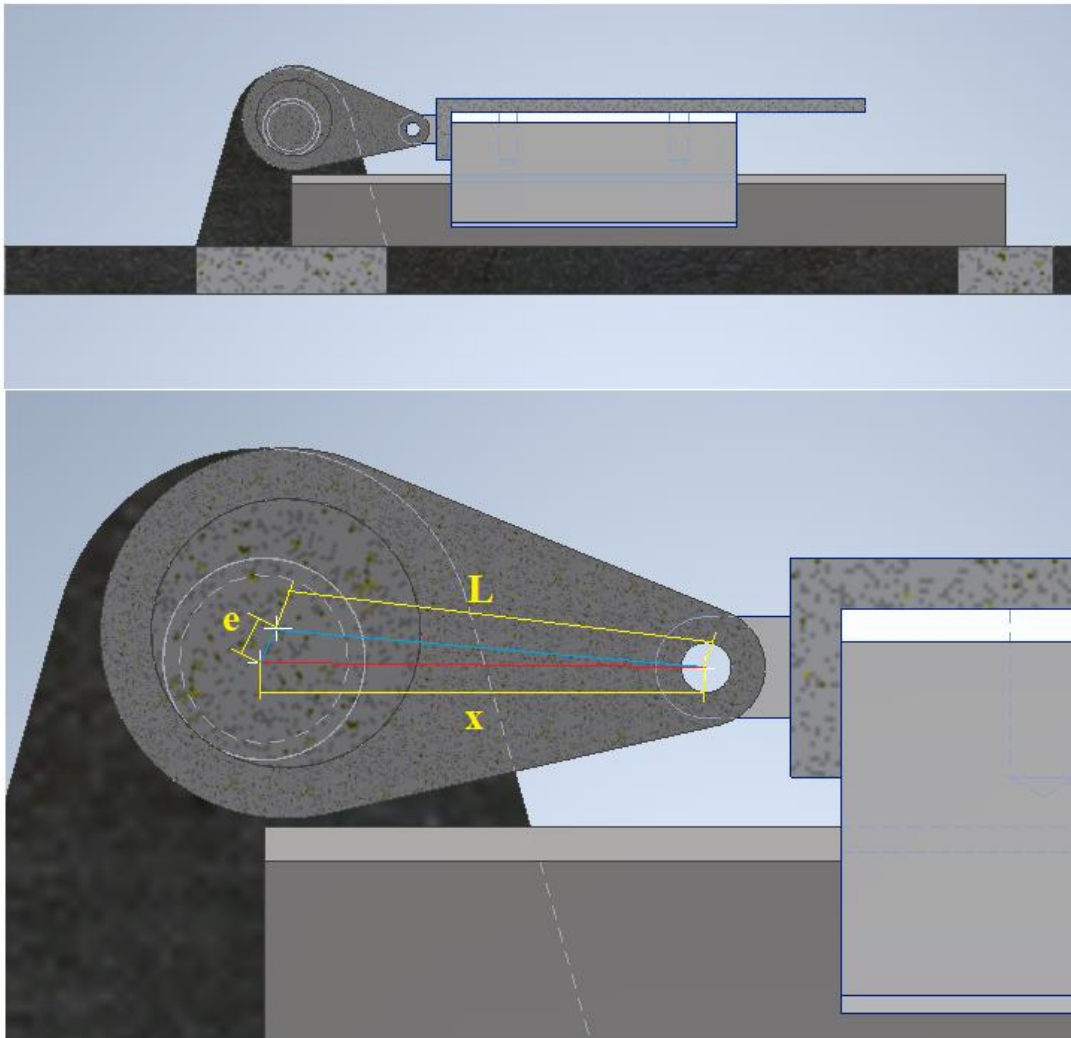
**Figura 16-3.** Modelo CAD del mecanismo biela manivela corredera con manivela excéntrica al eje con 2 mm, 1) Estructura base, 2) Eje, 3) Mesa de soldadura, 4) Rieles, 5) Deslizador, 6) Leva circular excéntrica, 7) Biela.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

El modelo realizado es un modelo simple del mecanismo biela manivela corredera, donde se utiliza la modificación de manivela excéntrica al eje.

Las medidas de las partes del mecanismo se observan en la siguiente figura, donde  $e$  es la excentricidad o Radio de la manivela,  $e = 2\text{mm}$ ,  $L$  es la longitud de la biela,  $L = 25\text{mm}$ , y  $x$  la ubicación del pasador que acopla con la mesa que se mueve con el deslizador sobre los rieles (Corredera).

La velocidad de rotación del eje para que el mecanismo oscile a una frecuencia de  $100\text{Hz}$  fue de  $\omega = 6000 \text{ RPM} = 200\pi \text{ rad/seg}$ . Para el análisis cinemático se utiliza esta velocidad de rotación constante ya que no se analizará cuando el mecanismo empieza a funcionar es decir desde que inicia con una velocidad igual a cero hasta la velocidad de trabajo.

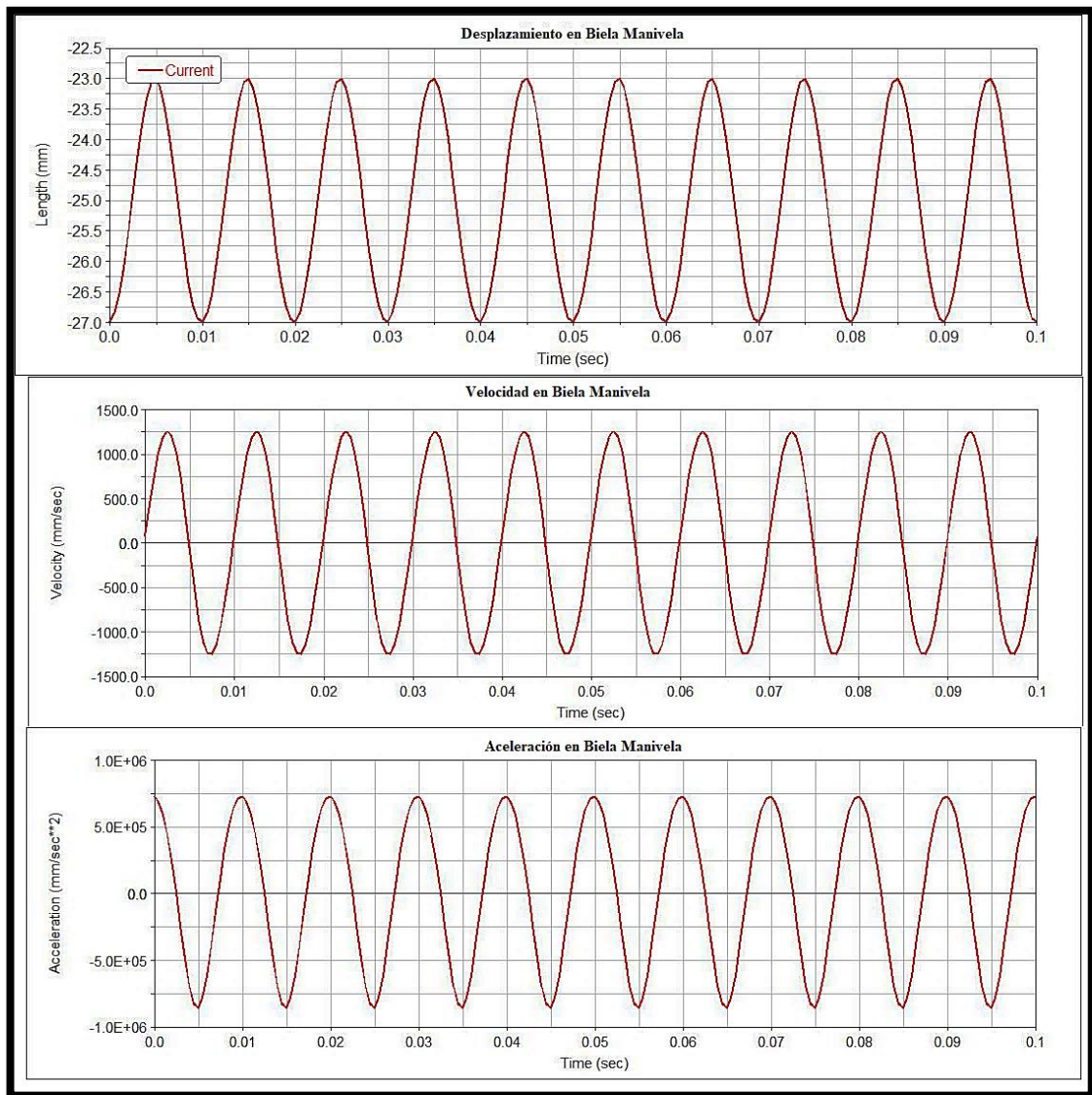


**Figura 17-3.** Vista de corte del mecanismo simplificado de biela manivela (Arriba). Dimensiones del mecanismo (abajo).

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Los resultados del desplazamiento, velocidad y aceleración del mecanismo se observan en la figura 18-3, se observa que se cumple que la amplitud de oscilación es de 4mm, y que tiene una forma senoidal sin ninguna interrupción, se observa que existen 10 ciclos en un tiempo de 0.1 segundos por tanto indica que si se está analizando en la frecuencia de oscilación aplicada en las simulaciones (100Hz).

La velocidad también tiene una forma senoidal sin ninguna interrupción, donde se ve que oscila entre (-1250 a 1250) mm/seg, los valores negativos de la velocidad no afectan a la soldadura ya que solo el valor negativo solo indica el cambio de dirección del movimiento y solo es necesario conocer su magnitud para la unión mediante soldadura, en la aceleración se tiene valores entre (-7.5 a 7.5) $\times 10^5$  mm/seg<sup>2</sup>, la aceleración es importante en este mecanismo porque está ligada a las fuerzas que actúan en el mecanismo y se verá en la dinámica del mecanismo.

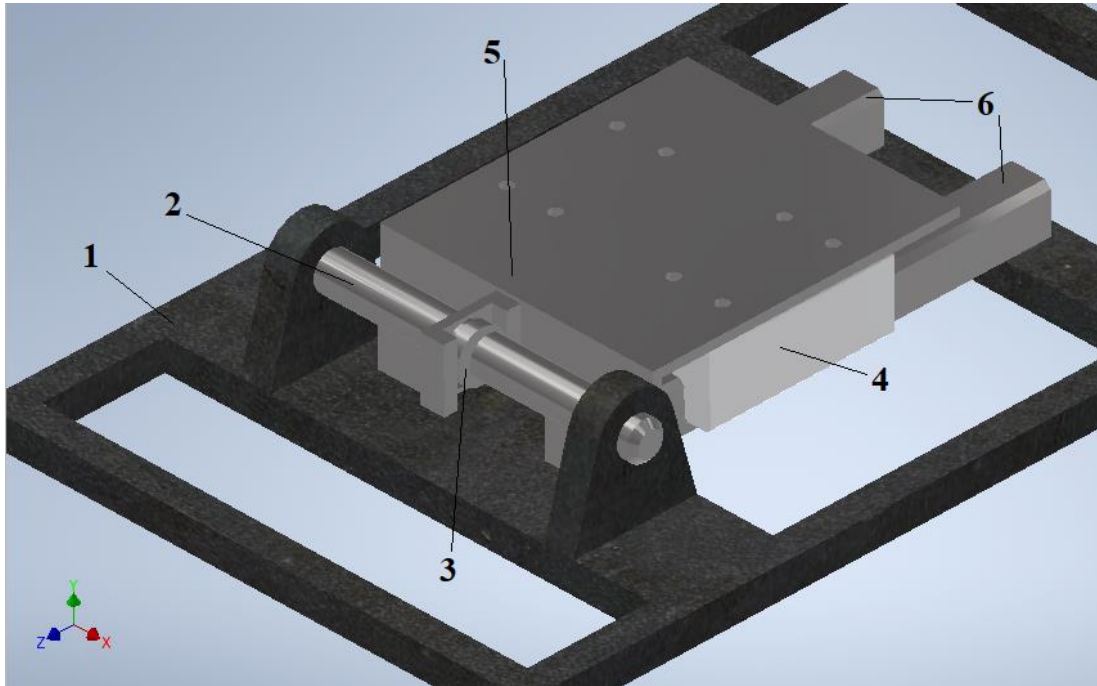


**Figura 18-3.** Resultados del análisis de posición, velocidad y aceleración.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

A continuación, se indica el modelo de leva circular excéntrica en el software CAD, en este modelo se utilizan los mismos elementos que el modelo anterior, pero con diferencia en la mesa de soldadura, ya que, al no haber una biela, se debe tener ahora un elemento de contacto que haga la función de seguidor de la leva en el mecanismo y este seguidor es un seguir plano.

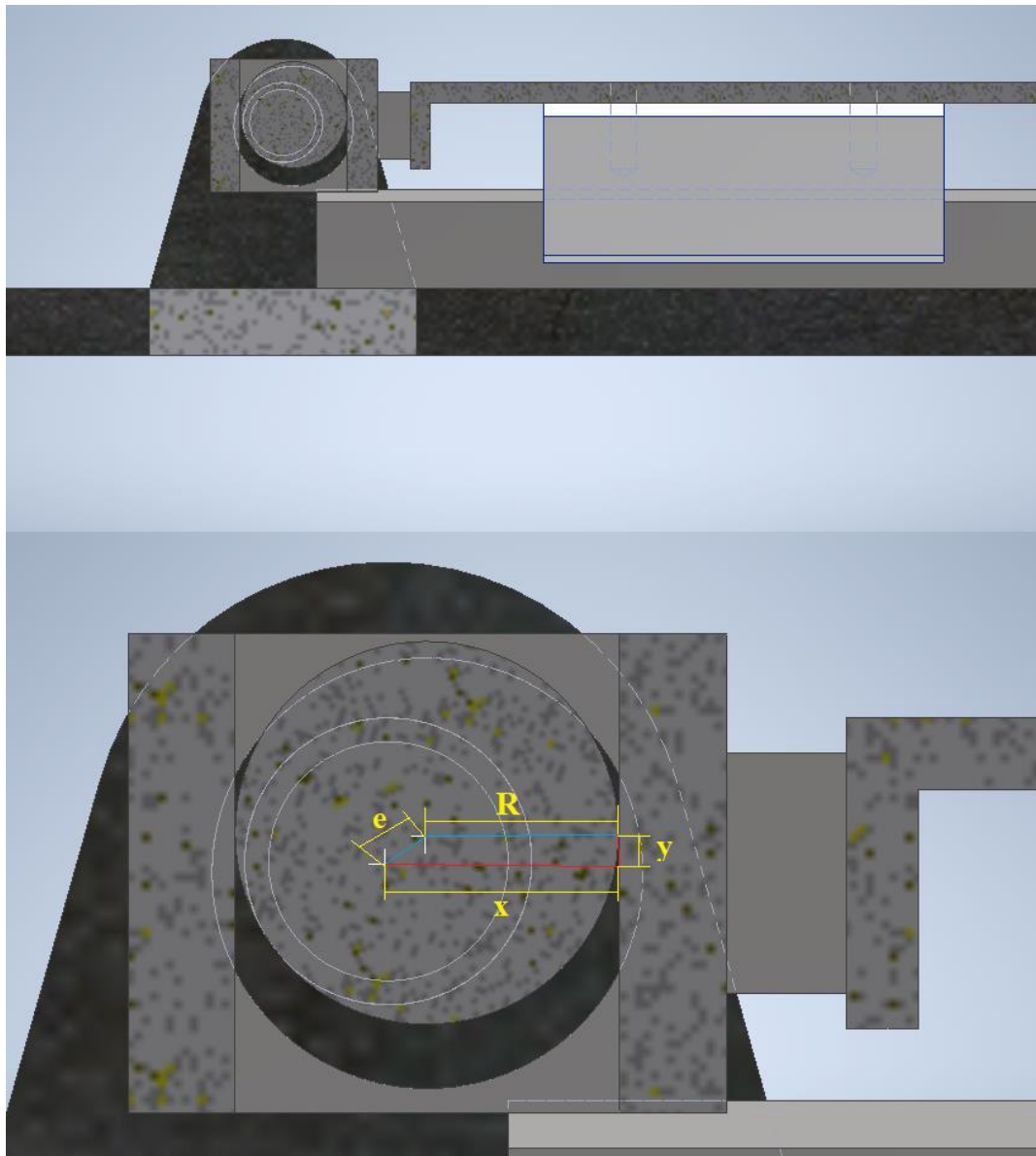




**Figura 19-3.** Mecanismo leva circular excéntrica. 1) Estructura base, 2) Eje, 3) Leva, 4) Deslizador, 5) Mesa acoplada a un seguidor, 6) Rieles.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

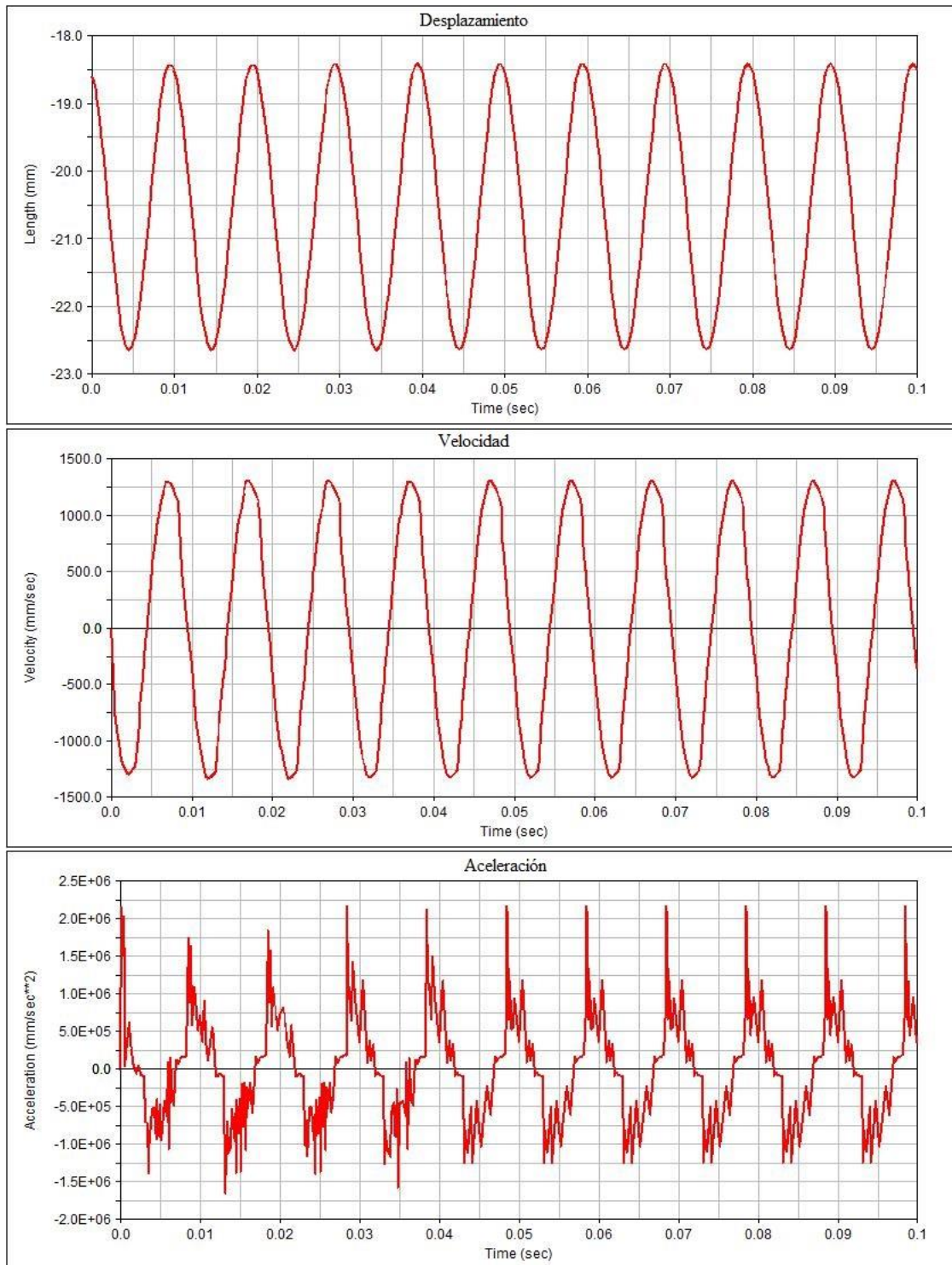
Las medidas que se utilizaron en este mecanismo son  $e = 2\text{mm}$  para la excentricidad, y  $R = 8\text{mm}$  para el radio de la leva circular. Como se indicó anteriormente se utilizaron los mismos elementos que en el mecanismo de biela manivela, con una sola diferencia en el elemento de la mesa, con el fin de determinar las diferencias y seleccionar el más adecuado.



**Figura 20-3.** Vista de corte del mecanismo de leva circular excéntrica (Arriba). Medias principales del mecanismo (Abajo).

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En la figura siguiente se observan los resultados del desplazamiento, velocidad y aceleración del mecanismo de leva circular excéntrica, en el cual se observa que hay una oscilación también senoidal pero con una amplitud de 4,2mm, hay una pequeña diferencia con la amplitud del mecanismo de biela manivela, esto se debe a que existe un pequeño juego entre la leva y el seguidor para que la leva pueda rotar o deslizarse entre las dos caras del seguidor.



**Figura 21-3.** Desplazamiento, velocidad y aceleración del mecanismo de leva circular excéntrica.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

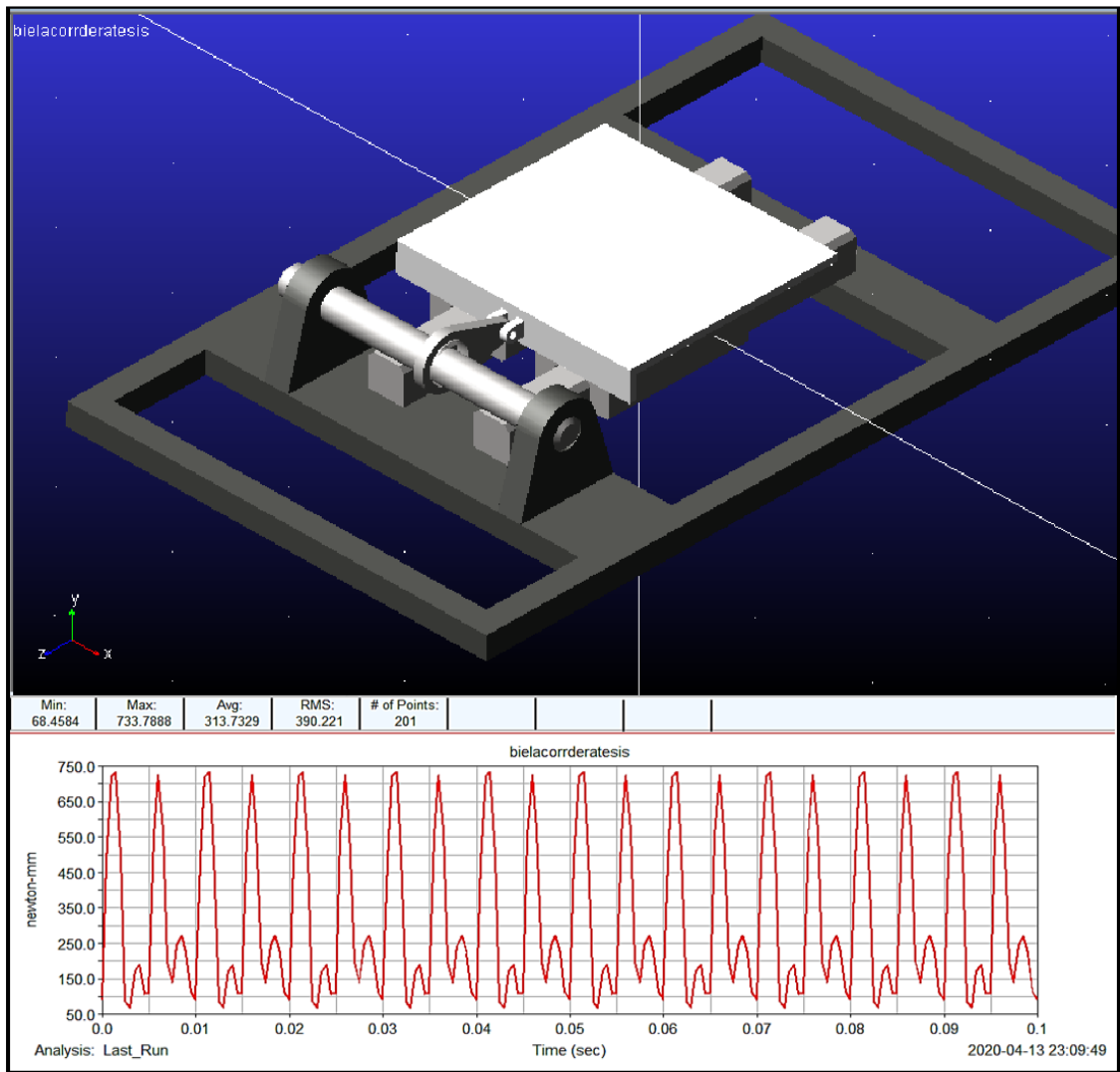
Luego se observa en la velocidad una gráfica casi sinusoidal, porque se observa una pequeña distorsión en las zonas altas y bajas de la gráfica, debido a la distancia del juego que existe entre la leva y el seguidor mencionado anteriormente el rango de valores para este gráfico es de (-1334 a 1314)mm/s. Finalmente se observa que la gráfica de la aceleración es una gráfica distorsionada

que tiende a ser senoidal, tiene un rango de valores entre  $(-1.64 \text{ a } 2.67) \times 10^6 \text{ mm/seg}^2$ , esta distorsión se debe al contacto que hay entre la leva y el seguidor, la fricción debida a la rugosidad entre las superficies y el juego de 0,2 mm que existe entre ellos generan estas distorsiones que se transformarán en golpeteos, al realizar el análisis dinámico.

Desde el punto de vista cinemático el mejor mecanismo a utilizarse para la mesa vibradora es el mecanismo de biela manivela, por cuanto al desplazamiento este mecanismo genera exactamente la amplitud de oscilación de 4mm, a diferencia del mecanismo de leva ya que su amplitud no es exacta debido a la tolerancia (juego geométrico) que debe tener la leva dentro del seguidor, esta tolerancia es necesaria para que la leva pueda deslizarse dentro del seguidor, además éste valor puede ir aumentado con el uso debido al desgaste de estos 2 componentes. En cuanto a la velocidad se tienen que ambos tienen una velocidad senoidal la diferencia entre los 2 mecanismos es el rango de valores, en la leva circular se tiene valores más altos que en la biela manivela, para la soldadura esto podría ser beneficioso ya que mientras más velocidad entre las piezas a soldar más probabilidad de llegar a la soldadura existirá, pero al tener valores más altos de velocidad conlleva a que los valores en la aceleración sean también altos en comparación con el otro mecanismo, en sus gráficas se observa que la aceleración de la leva circular es distorsionada debido principalmente a 2 factores que se mencionaron anteriormente, que generan valores de aceleración de hasta 2 veces más altos que en el mecanismo de biela manivela, el cual tiene una gráfica más uniforme y valores más bajos, estos valores de aceleración están relacionados con la fuerzas que actuarán en los elementos del mecanismos, por la segunda ley de Newton, es por ello que a continuación se realizará el análisis dinámico de los mecanismos.

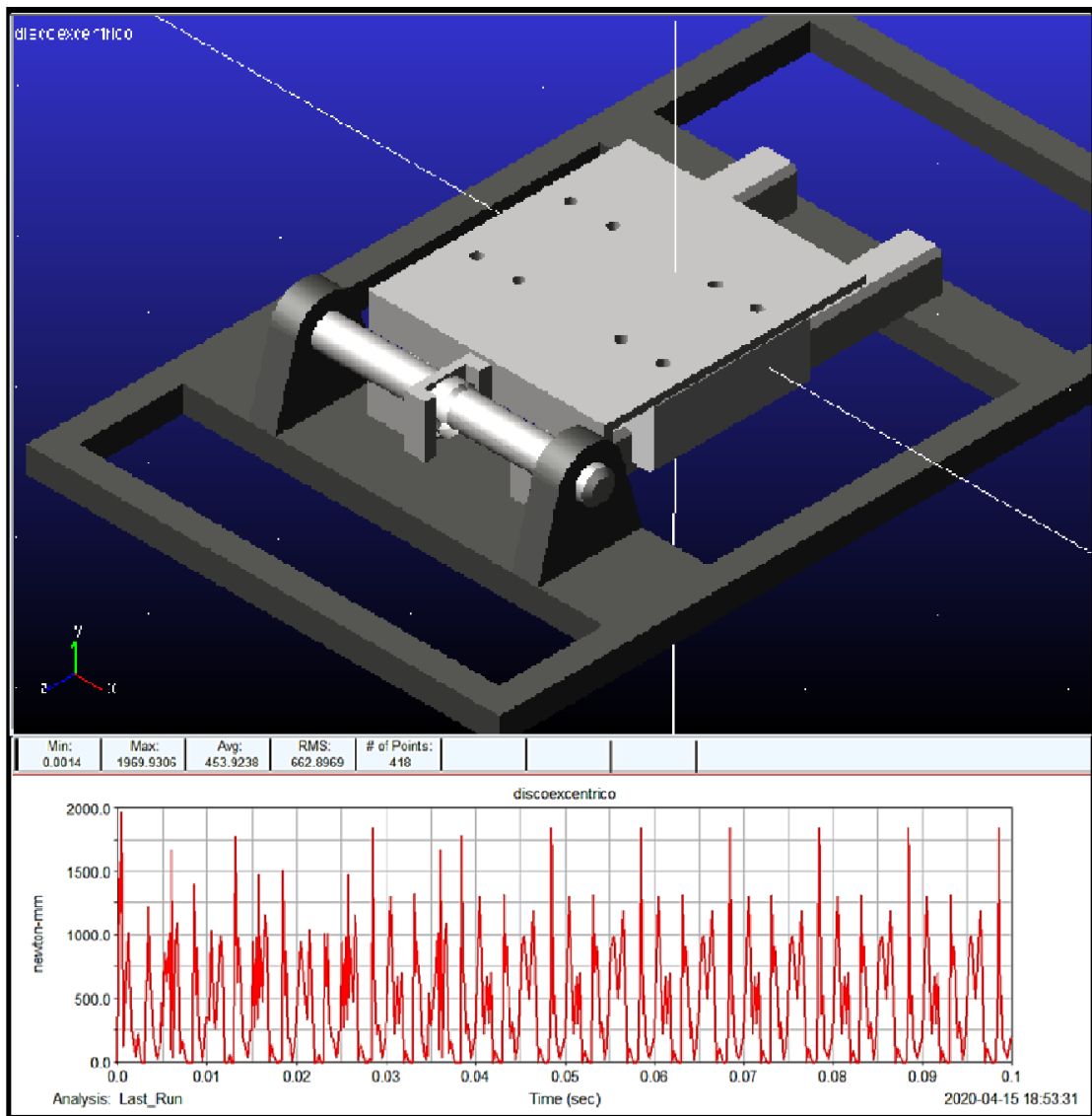
### ***3.5.7 Análisis Dinámico***

Se realizó el análisis dinámico de los dos mecanismos mediante el software Adams, para determinar el comportamiento del torque que debe ejercer el motor durante el funcionamiento, sin considerar una carga o fuerza externa. En los gráficos siguientes se indica los resultados obtenidos.



**Figura 22-3.** Gráfico de torque del mecanismo biela manivela

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.



**Figura 23-3.** Gráfico de torque del mecanismo leva circular excéntrico

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En la figura 22-3, se ve que el rango de valores del torque del mecanismo biela manivela es de alrededor de (68 a 733) N-mm, el valor promedio es de 313.73N-mm, el torque del mecanismo de leva circular excéntrico se ve en la figura 23-3, se tiene un rango de torque de (aproximadamente 0 a 1970) N-mm, con un promedio de 453.92 N-mm, en el gráfico se observan que existe mucha distorsión, debido al contacto de la leva con su seguidor y a sus tolerancias dimensionales, como ya se mencionó anteriormente esto puede traducirse en vibraciones excesivas en la máquina.

Se observan las claras diferencias entre ellas, se tiene que en el mecanismo biela manivela el torque es más bajo que el de leva circular excéntrico, además su gráfico es una línea más uniforme por lo que se tendrá un funcionamiento con menos vibraciones, por tanto, al seleccionar al primer mecanismo se requerirá un motor con menos potencia y además un funcionamiento más suave y con menos vibraciones en comparación al segundo mecanismo.

### 3.5.8 Evaluación y selección del mecanismo

Se recurrió al método de PUGH encontrado en el libro de (Ullman, 2004), para generar una matriz de selección del mecanismo que se desea emplear en la máquina (tabla 6-3), para ello se debe identificar los aspectos más importantes que se requiere en la máquina, estos aspectos son tanto funcionales, económicos, y de concepción; de los cuales se detalla a continuación:

Precisión de movimiento: Se requiere que la amplitud de oscilación de 4mm sea el más preciso.

Eficiencia: Este aspecto indica cual mecanismo es más eficiente, es decir cual mecanismo requiere menor potencia para generar el mismo movimiento y como la potencia mecánica está relacionada con el torque mediante la ecuación:

$$P = \tau * \omega \quad (\text{Ecuación 15})$$

Dónde, P es la Potencia mecánica,  $\tau$  es el torque y  $\omega$  es la velocidad angular.

La velocidad angular que se aplicará en el mecanismo es igual para los 2 mecanismos y su valor de es 6000rpm. Como la potencia es directamente proporcional al torque y la velocidad angular constante, podemos decir que, el mecanismo que requiera menos torque requerirá menor potencia.

Obtención de partes: Este aspecto relaciona con qué facilidad se puede obtener las piezas, es decir, si será necesario fabricar las partes o si se pueden comprar las partes existentes y adaptarlas a la máquina.

Ensamblado fácil: Aquí se puede decir que el mecanismo que requiera menor cantidad de movimientos o acciones para el ensamblado será el mejor.

Vibraciones: Como se tiene un mecanismo que genera y se transforma movimientos puede tener más o menos vibraciones dependiendo del mecanismo.

Cantidad de elementos: La utilización de menor cantidad de elementos será el mejor en este aspecto.

**Tabla 6-3.** Matriz de decisión del método PUGH

Seleccionar un mecanismo para la mesa vibradora		BMC	LCE
Precisión en el movimiento	10%	+1	0
Eficiencia	25%	+1	-1
Rápida obtención de partes	10%	+1	0
Ensamblado Fácil	10%	-1	+1
Costo de fabricación	20%	+1	0
Vibraciones bajas	10%	0	0

<b>Menor cantidad de elementos</b>	5%	-1	+1
<b>BMC: Mecanismo Biela Manivela</b>	<b>Total</b>	2	1
Corredera	<b>Peso total</b>	50	-10
<b>LCE: Mecanismo Leva Circular Excéntrica</b>			

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En la evaluación se dio un valor de +1 al mecanismo BMC debido a que genera la amplitud requerida, requiere menos torque que el LCE, por tanto, es más eficiente, sus partes se pueden obtener comprando partes ya fabricadas, pocas partes serán necesarias que sean mecanizadas, como pocas partes requieren ser mecanizadas su costo será menor, los inconvenientes (-1) que tiene el BMC, su ensamblado requiere de más acciones porque se tiene que ensamblar una biela el cual requerirá más precisión, y también se tiene más elementos en comparación al LCE, las ventajas que tiene LCE son el ensamblado porque el seguidor debe ser mecanizado solamente se insertará en la leva circular, y al no tener biela, ya posee menos elementos. En ambos mecanismos como se tiene un disco girando excéntricamente 2mm de su eje, se provee que existirán vibraciones en la máquina, que se puede decir que son iguales en ambos mecanismos, por lo que ambos tienen un valor de 0.

Con esta técnica de evaluación y selección se puede decir que el mecanismo más adecuado es el mecanismo de Biela Manivela Corredera, con el cuál se procederá a realizar un diseño más detallado, eficiente y más real.

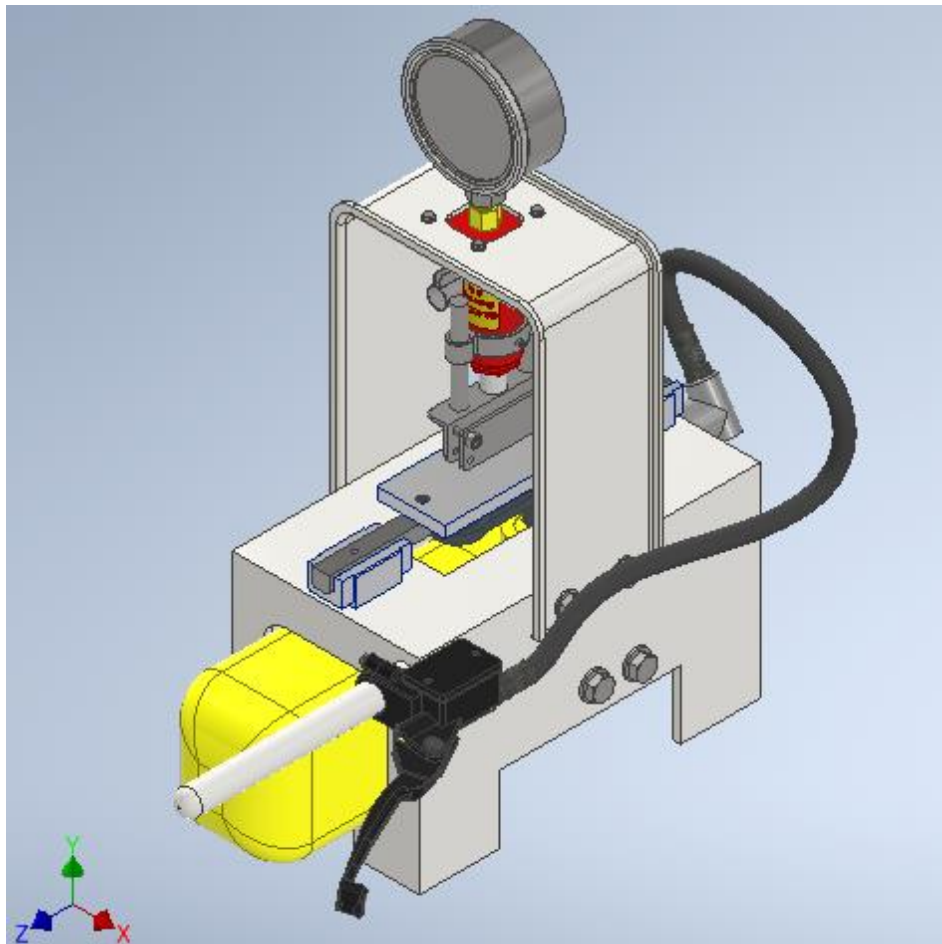
### **3.5.9 Modelado y ensamble CAD del prototipo**

Se realizó un nuevo modelo CAD del prototipo de la máquina de soldadura por fricción lineal, para poder realizar las simulaciones de movimiento cinético para verificar que el mecanismo cumple con los requerimientos especificados de movilidad, además se hará un análisis dinámico para determinar las fuerzas involucradas, que posteriormente se usarán para el análisis por el Método de Elementos Finitos y determinar la resistencia de los elementos que conforman el mecanismo principal del prototipo.

El modelo se lo realizó nuevamente en el software Inventor, el cuál gracias a sus entornos de simulación dinámica y análisis de tensión, se puede realizar lo descrito anteriormente, que finalmente servirá como base para la construcción de la máquina.

Primero se realizó el dibujo representativo de los elementos que se pueden adquirir en el mercado, como son el motor, el riel, los deslizadores, la gata hidráulica, el freno de mano y la bomba auxiliar de embrague, con sus medidas principales para luego realizar el dibujo de los elementos que se deben construir a partir de los primeros elementos descritos y luego ensamblarlos, en la siguiente imagen se observa el conjunto de la máquina ya ensamblado.





**Figura 24-3.** Ensamble de la máquina de soldadura por fricción lineal en el ambiente de Inventor

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

### ***3.5.10 Selección de elementos principales***

#### ***3.5.10.1 Selección del motor***

El motor que se seleccionó para incorporarlo a la máquina de la presente investigación fue el motor de esta Amoladora de la marca Dewalt, con su código D28499X (fig. 25-3), que se puede encontrar en cualquier catálogo de la ésta marca, con sus siguientes especificaciones:

Velocidad de operación: 6000 RPM.

Potencia: 5,3 HP

Éste motor tiene la ventaja de que gira a la frecuencia que se requiere para la soldadura por fricción, establecida en la tabla 5-3, la cual indica una frecuencia de 100Hz, por tanto, evita la implementación de un mecanismo de caja reductora, para obtener velocidades altas de rotación, si se seleccionaba un motor CA convencional.

Además, éste motor tiene una de las más altas potencias que se puede encontrar en el mercado nacional, que operen con la red eléctrica doméstica en el Ecuador que es 120V corriente alterna monofásica. La cuál permitirá que la máquina sea usada en cualquier lugar con éste suministro de energía.

Se puede calcular el torque máximo aproximado que se puede obtener con este motor mediante la fórmula 15, despejando el torque de la fórmula.

Despejando el torque, queda:  $\tau = P/\omega$ .

Usando los valores de 628,32 rad/s para la velocidad angular y 3952,21 W para la potencia su poniendo una eficiencia del 100%, debido a que el fabricante no proporcionó esta información, por tanto, se obtiene un torque de 6,29 N-m.



**Figura 25-3.** Amoladora D28499X

**Fuente:** <http://www.dewaltcenter.com.ec/detalles.php?producto=21>

También esta máquina herramienta tienen una ventaja en su estructura, que se muestra en la siguiente figura. En la cual se observa que tiene 2 agujeros roscados en ambos costados de su estructura metálica, lo que permite una fácil y mejor adaptación a la estructura de la máquina a construir.



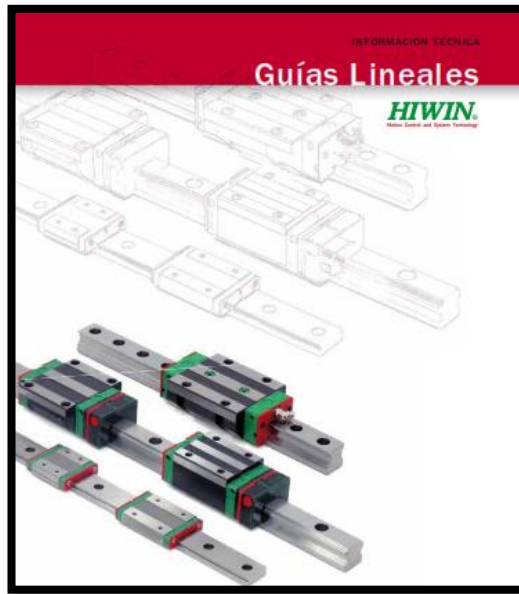
**Figura 3-26.** Sujeciones del motor

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

### 3.5.10.2 *Corredera de la mesa vibradora*

Un elemento importante del mecanismo de la mesa vibradora es la corredera, la corredera debe ofrecer la menor resistencia al movimiento, tener el menor desgaste posible durante el funcionamiento, y tener una vida útil aceptable.

Para la corredera de la mesa se utilizaron los deslizadores y guías lineales de la marca HIWIN, estas guías permiten el movimiento lineal y utilizan elementos de rodadura tales como bolas o rodillos. Utilizando la recirculación de estos elementos entre el raíl y los patines, las guías lineales pueden alcanzar un alto nivel de precisión en su recorrido. Comparadas con los sistemas tradicionales, las guías de recirculación de bolas y de rodillos sólo tienen un coeficiente de fricción de 1/50. Debido a la configuración de arco circular de cuatro hileras, las guías lineales pueden soportar cargas en dirección radial, radial inversa y lateral. Con estas características, las guías lineales mejoran mucho la precisión del movimiento. (HIWIN, Guías Lineales)



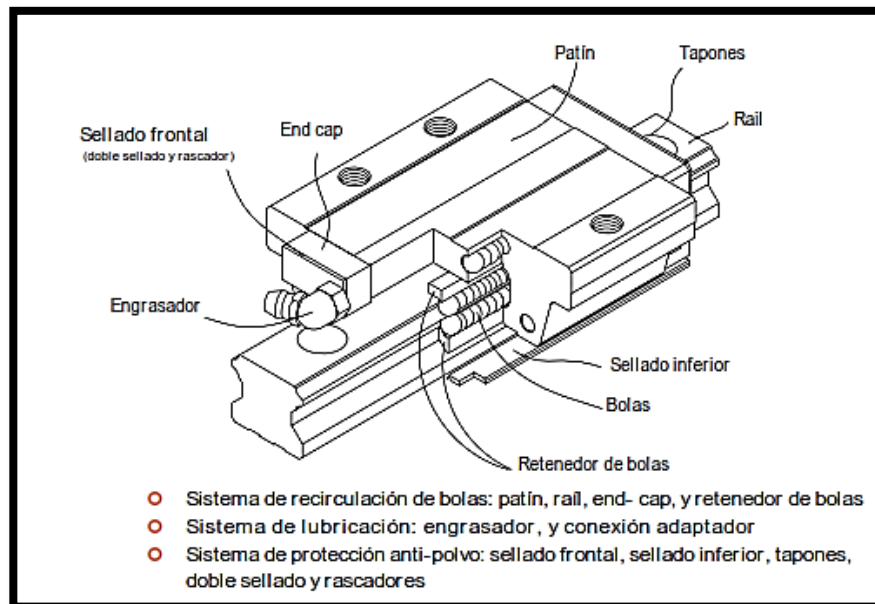
**Figura 27-3.** Catálogo HIWIN

**Fuente:** (HIWIN, s. f.)

En la información de las guías lineales HIWIN, se puede encontrar las ventajas al usar las guías son las siguientes:

- Alta precisión de posicionamiento.
- Larga vida útil con Movimiento de alta precisión.
- Es posible alcanzar altas velocidades con poca potencia.
- Misma capacidad de carga en todas direcciones.
- Fácil montaje.
- Fácil lubricación.
- Intercambiabilidad.

En su catálogo se puede encontrar varias clases de guías, pero la guía que se aplicó para la corredera es de la serie HG, específicamente las guías HG15, que es muy utilizado en fresadoras, tornos, rectificadoras y centros de mecanizado. Las partes que forman parte de las guías se puede observar en la figura 28-3.



**Figura 28-3.** Construcción de la serie HG

Fuente: HIWIN. Información Técnica

La información sobre las dimensiones, cargas, montaje, desmontaje y mantenimiento de las guías y patines HG15, se encuentra en la información técnica de HIWIN (Anexo B), que se encuentra en la sección de anexos de la presente investigación.

### 3.5.10.3 Sistema de frenado

Todas las máquinas rotatorias cuando se apagan o se interrumpe la fuente de energía, el eje del motor continúa rotando debido a la inercia de sus componentes, y éste se detiene por la fricción, para la soldadura por fricción lineal, se requiere que el mecanismo se detenga lo más rápido posible, por este motivo es necesario implementar un sistema de frenado.

El sistema de frenado está conformado por una bomba de freno de motocicleta con código KIMISSq1a9fggnrd-01 (figura 28-3), la cual generará la presión del líquido de freno, la cuál será recibida por un cilindro esclavo de embrague 25183025 de Chevrolet Aveo 2006 (figura 46), los cuáles se adaptaron al prototipo y se encuentran comunicados por una manguera hidráulica de freno para motocicleta marca Kweiny con código XZMCBL009 (figura 29-3). Estos elementos se los puede conseguir en cualquier catálogo en la red como en la tienda de Amazon.



**Figura 29-3.** Bomba maestra KIMISSq1a9fgnrd-01

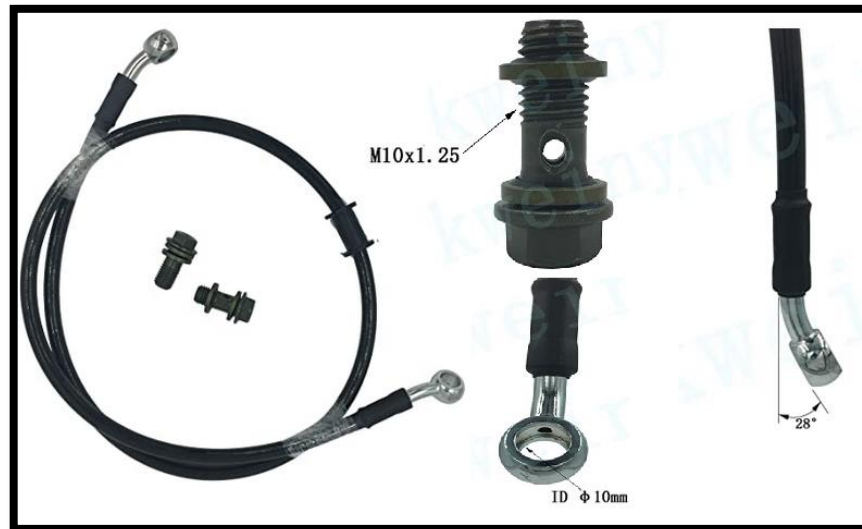
**Fuente:** <https://www.amazon.es/KIMISS-Delantero-Motocicleta-Embrague-Cilindro/dp/B07FCDZLVX>

La bomba de freno delantera (fig. 29-3), generará la presión del líquido de freno, mediante la aplicación de fuerza en la palanca, ésta presión es transportada por una manguera hidráulica específica para la aplicación de frenos en motocicletas (fig. 31-3), éste líquido llega al cilindro esclavo de embrague (fig. 30-3), donde la presión del líquido desplazará al pistón del cilindro el cuál va unido a una horquilla que tiene incorporada una zapata de freno, el cual hará contacto con el acople excéntrico del mecanismo y así detener el movimiento del mecanismo cuando se apaga el motor.



**Figura 30-3.** Cilindro esclavo de embrague 25183025 para Chevrolet Aveo 2006

**Fuente:** <https://www.amazon.com/-/es/cilindro-embrague-Chevrolet-25183025-96293075/dp/B08562KHVS>

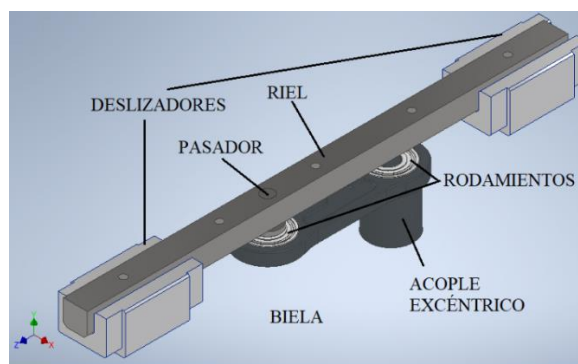


**Figura 31-3.** Manguera hidráulica de freno o embrague para motocicleta marca Kweiny

**Fuente:** [https://www.amazon.com/-/es/Kweiny-hidr%C3%A1ulica-motocicleta-ciclomotor-3-0/dp/B07T3TZX13/ref=sr\\_1\\_84?\\_\\_mk\\_es\\_US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=2C RXQ2GPJG82Z&dchild=1&keywords=manguera%2Bde%2Bfreno%2Bhidr%C3%A1ulico%2Bpara%2Bmoto&qid=1606451080&prefix=manguera%2Bde%2Bfreno%2Caps%2C264&sr=8-84&th=1](https://www.amazon.com/-/es/Kweiny-hidr%C3%A1ulica-motocicleta-ciclomotor-3-0/dp/B07T3TZX13/ref=sr_1_84?__mk_es_US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=2C RXQ2GPJG82Z&dchild=1&keywords=manguera%2Bde%2Bfreno%2Bhidr%C3%A1ulico%2Bpara%2Bmoto&qid=1606451080&prefix=manguera%2Bde%2Bfreno%2Caps%2C264&sr=8-84&th=1)

### 3.5.11 *Análisis cinético y dinámico – Determinación del torque requerido*

En este análisis se aisló el mecanismo biela-manivela-corredera del resto de componentes de la máquina, para reducir el coste computacional y principalmente observar que su movimiento sea el correcto.



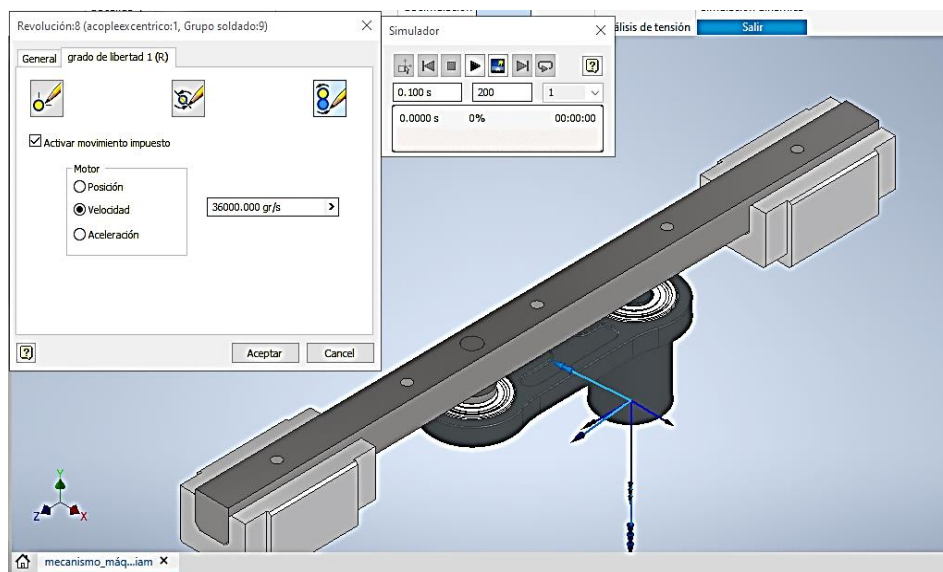
**Figura 32-3.** Mecanismo Biela-Manivela-Corredera

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

El mecanismo de la figura 32-3, está conformado por un acople excéntrico el cual está unido por un extremo al eje roscado del motor, quien le transmitirá el movimiento al mecanismo, el otro extremo del acople tiene un diámetro menor y excéntrico 2mm con respecto al eje del motor,

donde se acoplará a un rodamiento mediante ajuste a presión, los rodamientos están unidos a la biela también con ajuste a presión, al igual que el pasador de la articulación con el otro rodamiento, éste pasador se une al riel mediante roscado y soldadura.

Una vez obtenido el modelo del mecanismo se lo importa al ambiente de simulación dinámica (figura 33-3), para poder obtener los distintos gráficos para el análisis cinético y dinámico. Aquí los pares de unión son reconocidos automáticamente por el software a partir de las restricciones de ensamblado que se encuentren en el modelo, luego se selecciona el par de revolución del eje excéntrico que se une al eje para poder ingresar la velocidad requerida para el funcionamiento, para facilitar el análisis se ingresa el valor de la velocidad angular como constante y su valor es de 36000 deg/s. Se corre la simulación en un tiempo de 0 a 0.1 seg debido a que la velocidad de rotación es muy elevada se escogió usar un lapso de tiempo donde se puedan observar 10 ciclos de movimiento.

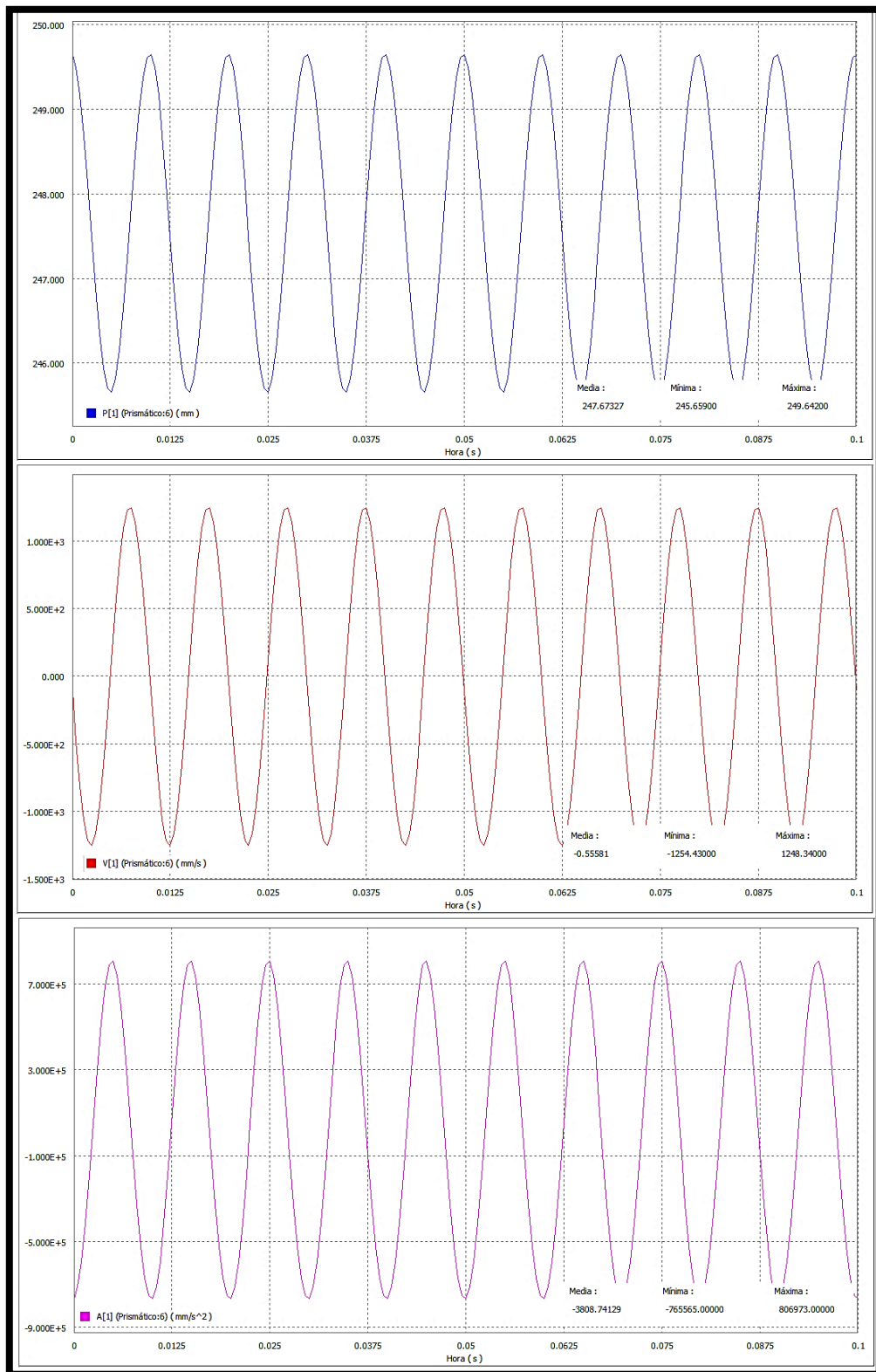


**Figura 33-3.** Mecanismo en el ambiente de simulación dinámica.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Luego de hacer la simulación se selecciona la opción de gráfico de salida, para poder obtener los gráficos pertinentes al movimiento del mecanismo y que se ven a continuación.





**Figura 34-3.** Gráfico de posición, velocidad y aceleración del mecanismo.

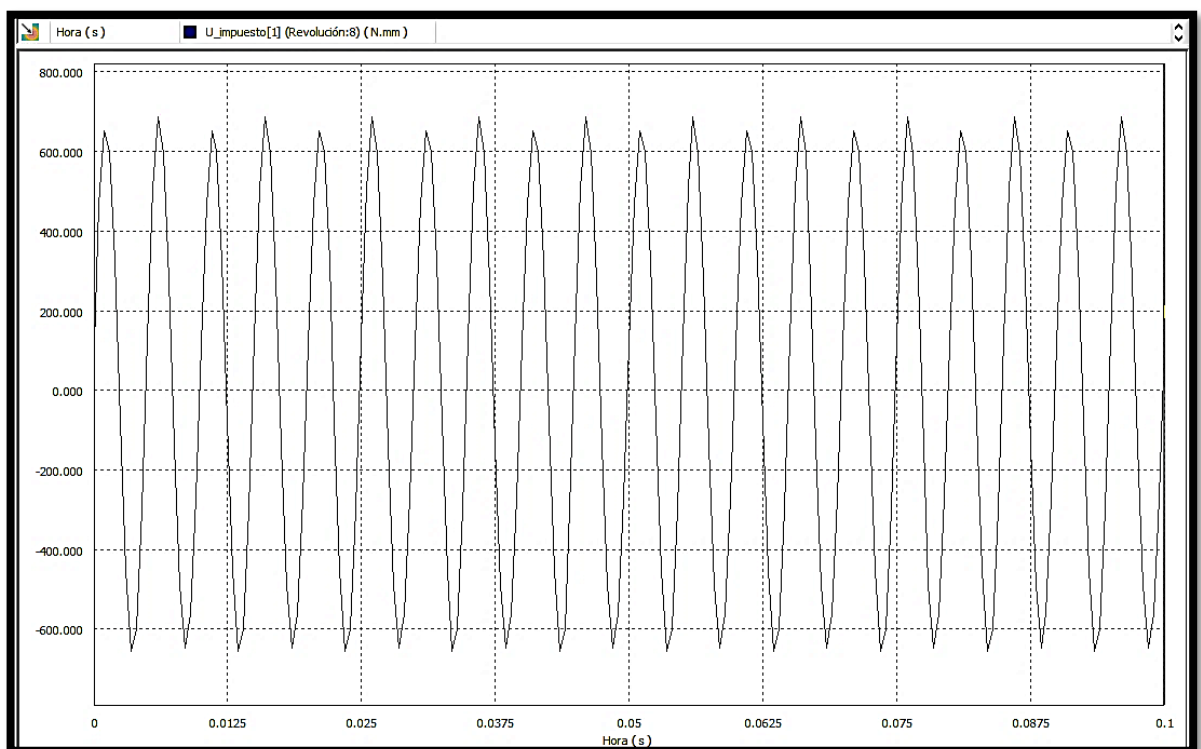
Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Se puede observar en la figura 33-3, los gráficos de posición velocidad y aceleración del riel del mecanismo, nombrado por el software como prismático 1, en donde se puede identificar que el

movimiento es de tipo sinusoidal en las 3 magnitudes lo cual indica que tendrá un funcionamiento adecuado, el movimiento es preciso ya que se requiere que la amplitud de movimiento es de 4mm y en el gráfico de posición se puede determinar que la diferencia entre los valores máximos y mínimo de esta magnitud si es de 4mm.

Es importante también determinar el valor del torque requerido para el accionamiento de la máquina, con el objetivo de conocer si el motor seleccionado cumplirá con los requerimientos.

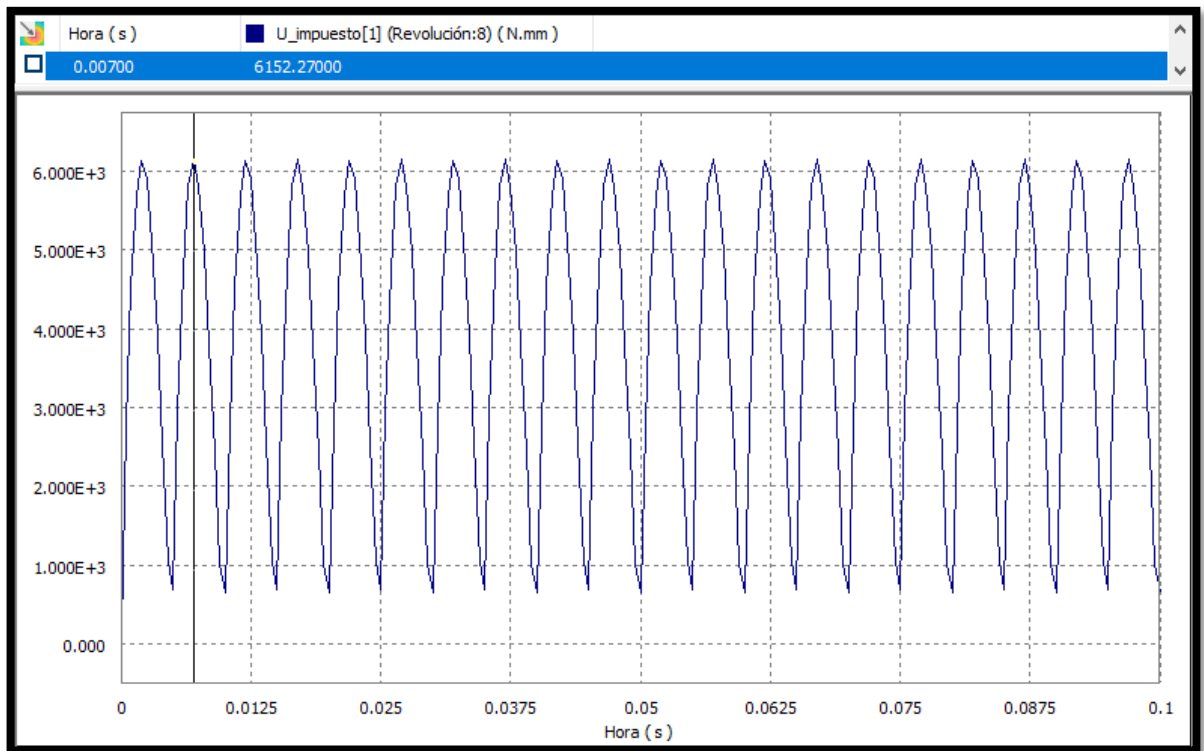
Se obtuvo primero el gráfico del torque necesario para que el prototipo funcione sin una carga es decir simular solamente el encendido del motor, con velocidad constante. El resultado del torque necesario se ve en el gráfico 35-3, en donde se determina que el torque máximo que se debe aplicar en la máquina es de alrededor de 687 N-mm, determinando que el motor seleccionado si abastecerá el torque requerido.



**Figura 35-3.** Gráfico del torque requerido del motor sin carga.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Cómo el motor seleccionado puede abastecer alrededor de 6 N-m (6000 N-mm), se va a buscar un valor de carga sobre el riel que haga que sea necesario que el motor entregue este valor de torque en el sistema, siendo ésta carga el valor máximo que se puede aplicar en función del torque máximo del motor.



**Figura 36-3.** Torque requerido del motor para una carga de 6000 N

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En el gráfico 36-3, se observa que el torque máximo requerido por el motor para una simulación del mecanismo funcionando con una carga de 6000 N, y éste valor de torque es de 6152 N-mm, que serían el torque máximo y carga máxima momentánea aplicado en el prototipo.

Se puede decir que el rango de valores del torque del motor que debe ejercer sobre el mecanismo es de 0.6 a 6.15 N-m.

### 3.5.12 Determinación de esfuerzos (Análisis por el Método de Elementos Finitos)

Una vez determinado que el mecanismo funcione correctamente desde el punto de vista cinemático y dinámico, se necesario, saber si los elementos resistirán los esfuerzos producidos por las distintas fuerzas y momentos que están presentes en el funcionamiento del mecanismo. Para realizar este análisis se usó otro entorno que se encuentra en el software Inventor, denominado Análisis de tensión, este entorno es muy útil ya que interacciona con el entorno de simulación dinámica, ayudando al usuario con la importación de fuerzas calculadas en el análisis dinámico y trasladarlos al análisis de tensión, sin necesidad de que lo haga el usuario.

Es necesario indicar que Inventor hace el análisis de tensión de cada elemento que conforma el mecanismo es por este motivo que se debe análisis principalmente el acople excéntrico, la biela,

el conjunto riel-pasador y la mesa estructural, ya que son los elementos que se van a construir a partir de los planos generados por el modelo CAD realizado y validado.

### 3.5.12.1 Acople excéntrico (Funcionamiento en vacío)

Para el análisis de este elemento se usaron las siguientes propiedades de material.

**Tabla 7-3.** Material usado en el acople excéntrico

Nombre	Hierro, fundido	
General	Densidad de masa	7.15 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	758 MPa
	Resistencia máxima a tracción	884 MPa
Tensión	Módulo de Young	120.5 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.3 su
	Módulo cortante	46.3462 GPa

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Para realizar este análisis se determinó en inventor el tiempo en que las fuerzas presentes en este elemento son las máximas, automáticamente el software traslada estas magnitudes a su entorno de análisis de tensión, con los siguientes valores para la simulación del mecanismo sin carga.

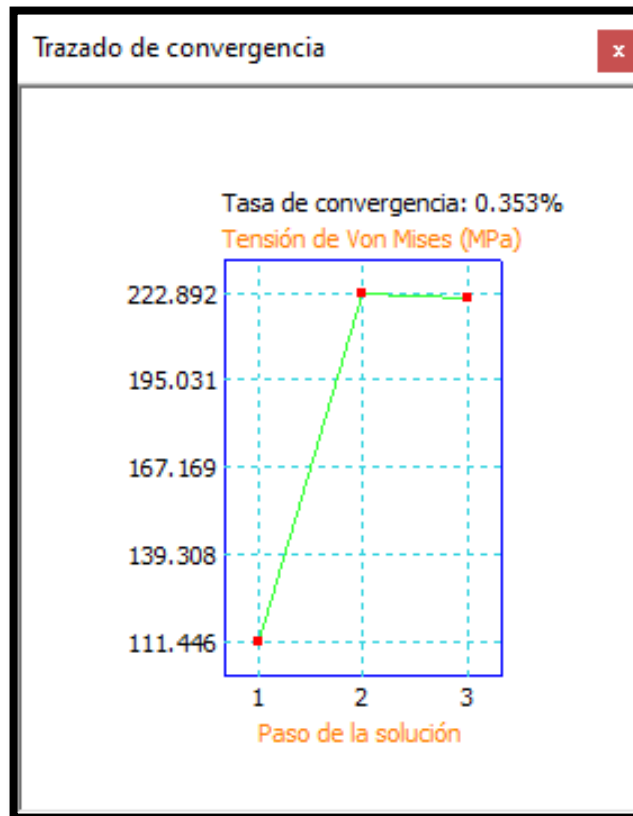
**Tabla 8-3.** Fuerzas y momentos presentes en el acople excéntrico para el mecanismo sin carga

Tipo de carga	Fuerza remota
Magnitud	762.892 N
Vector X	-5.326 N
Vector Y	3.051 N
Vector Z	-762.867 N
Punto remoto X	267.635 mm
Punto remoto Y	-237.762 mm
Punto remoto Z	182.455 mm

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

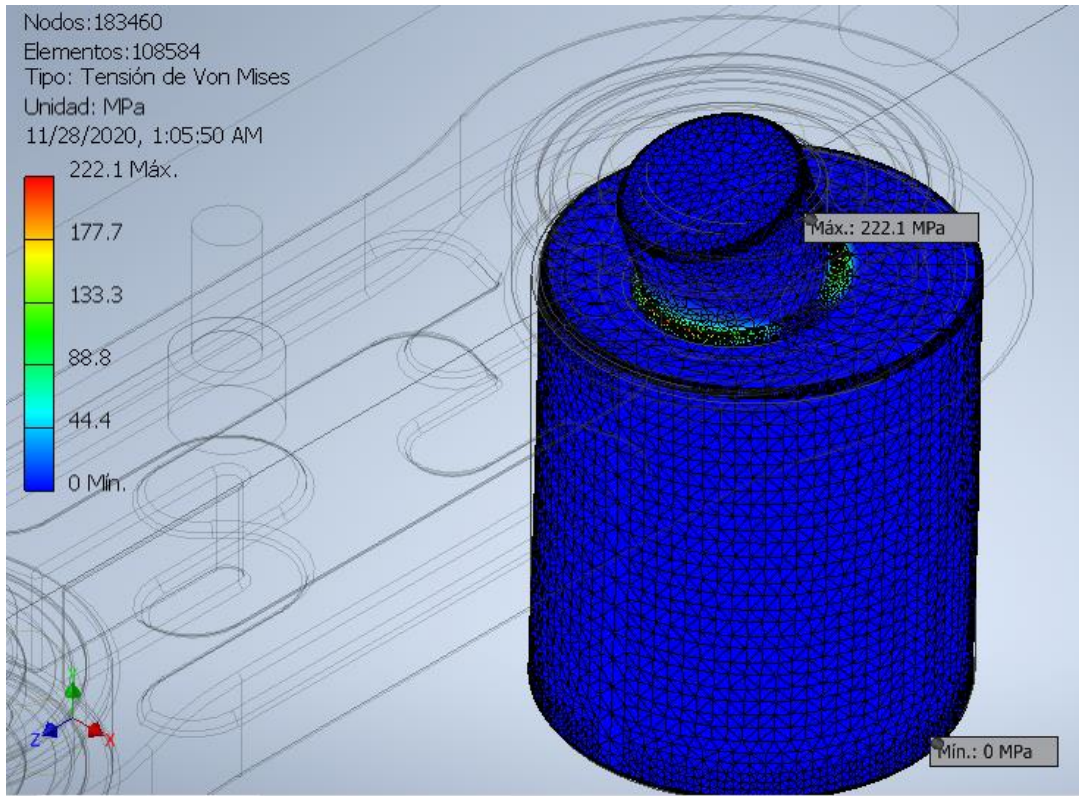
En la figura 38-3, se puede observar el resultado de los esfuerzos presentes en el acople excéntrico, donde se puede determinar que el valor más alto de esfuerzo equivalente de Von Mises es de 222.1 MPa y el valor más bajo es de 0 Mpa. También se observó que el mallado utilizado es refinado, por tanto, se observa en la imagen que se encuentran 183460 nodos y 108584 elementos presentes en el mallado, indicando que la malla usada

adecuada para el análisis, ya que se llega a una tasa de convergencia de 0.353% (figura-37-3).



**Figura 37-3.** Tasa de convergencia en el análisis del acople excéntrico

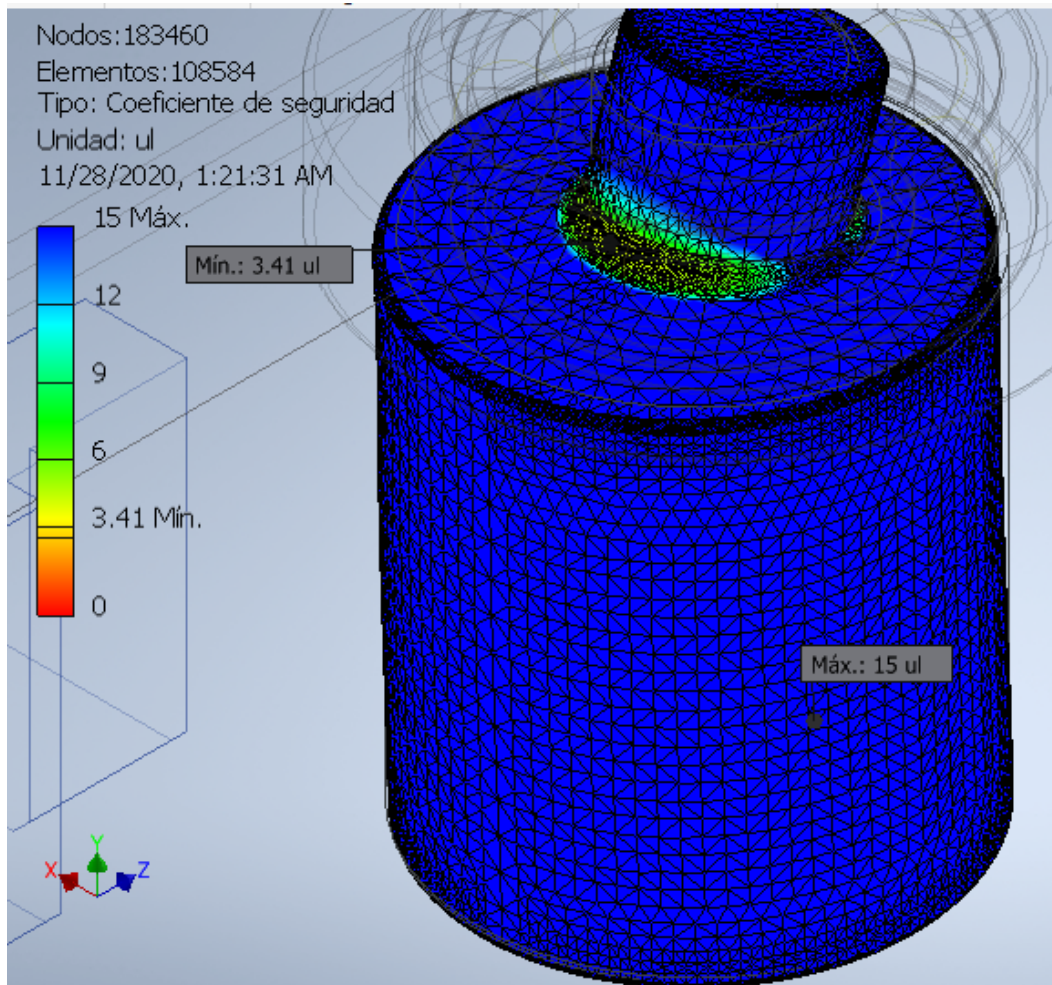
**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.



**Figura 38-3.** Resultado de esfuerzos equivalente de Von Mises

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Además de determinar los esfuerzos presentes en éste elemento, también se requiere, determinar el coeficiente de seguridad, que es quién indica si el elemento fallará o no. Los valores de coeficiente de seguridad superiores a 1 indican que el elemento no fallará, pero en la presente investigación se tomará como criterio de diseño obtener valores del factor de seguridad iguales o mayores a 2 para el correcto funcionamiento y garantizar que el elemento no fallará.



**Figura 39-3.** Coeficiente de fricción del acople excéntrico sin carga en el mecanismo

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En la figura 39-3, se puede observar el valor y ubicación del coeficiente de seguridad más bajo que es de 3.41, para el movimiento del mecanismo sin carga aplicada, es decir, este valor se obtendrá al encender la máquina antes de empezar la soldadura por fricción y nos indica que éste elemento no fallará en esta etapa.

### 3.5.12.2 Biela (Funcionamiento en vacío)

Las características del material usado en la biela se ven en la tabla siguiente.

**Tabla 9-3.** Propiedades mecánicas del elemento de la biela

Nombre	Hierro, fundido	
General	Densidad de masa	7.15 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	758 MPa

	Resistencia máxima a tracción	884 MPa
<b>Tensión</b>	Módulo de Young	120.5 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.3 su
	Módulo cortante	46.3462 GPa
<b>Nombre(s) de pieza</b>	Bielareal	

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En la tabla 10-3, se observan las cargas aplicadas en la biela del mecanismo.

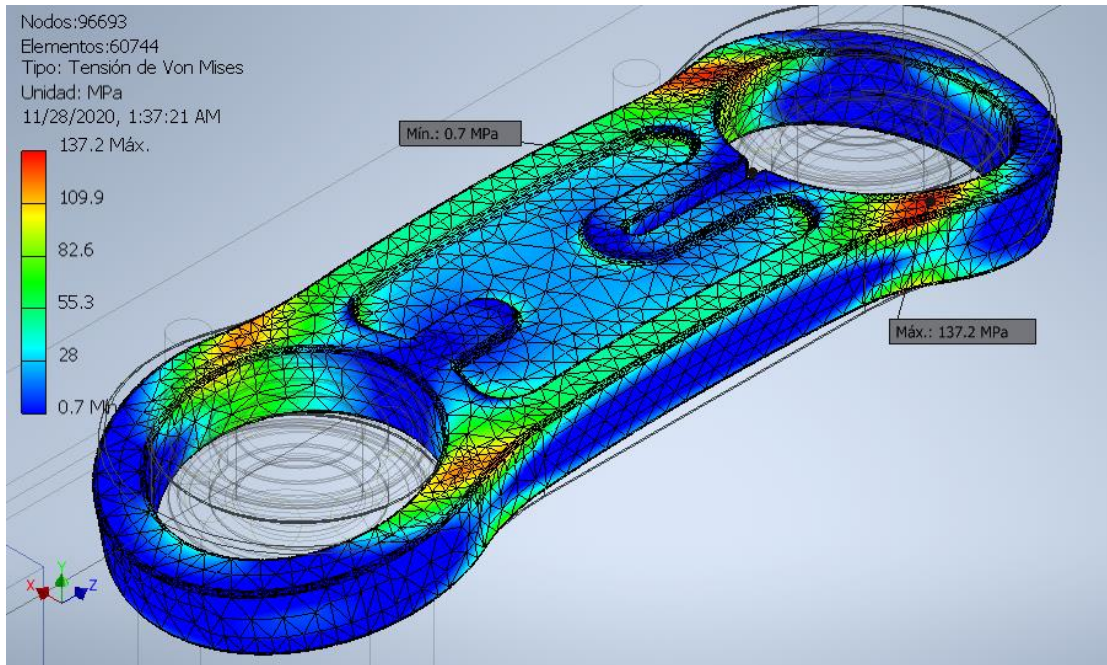
**Tabla 10-3.** Cargas aplicadas a la biela

<b>Tipo de carga</b>	<b>Fuerza remota 1</b>	<b>Fuerza remota 2</b>	<b>Momento 1</b>	<b>Momento 1</b>
Magnitud	740.138 N	611.343 N	10854.481 N mm	10854.481 N mm
Vector X	-3.241 N	-2.736 N	10854.358 N mm	10854.358 N mm
Vector Y	1.802 N	-0.216 N	0.000 N mm	0.000 N mm
Vector Z	-740.129 N	611.337 N	51.573 N mm	51.573 N mm
Punto remoto X	267.818 mm	267.635 mm		
Punto remoto Y	-198.262 mm	-198.262 mm		
Punto remoto Z	184.446 mm	259.446 mm		

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

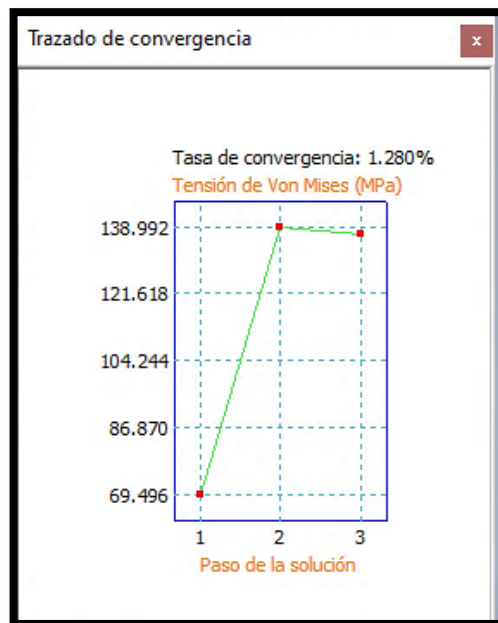
Luego de realizar la simulación de esfuerzos se obtuvo que el valor máximo es de 137,2 MPa y el menor 0.7 MPa, ubicados donde indica la figura 3-40. El mallado del elemento tiene 96693 nodos y 60744 elementos, donde la eficiencia del mallado se puede observar en la figura 41-3, donde nos indica que la simulación llegó a una tasa de convergencia de 1,28% aproximadamente.





**Figura 40-3.** Esfuerzos presentes en la biela sin carga aplicada al mecanismo

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

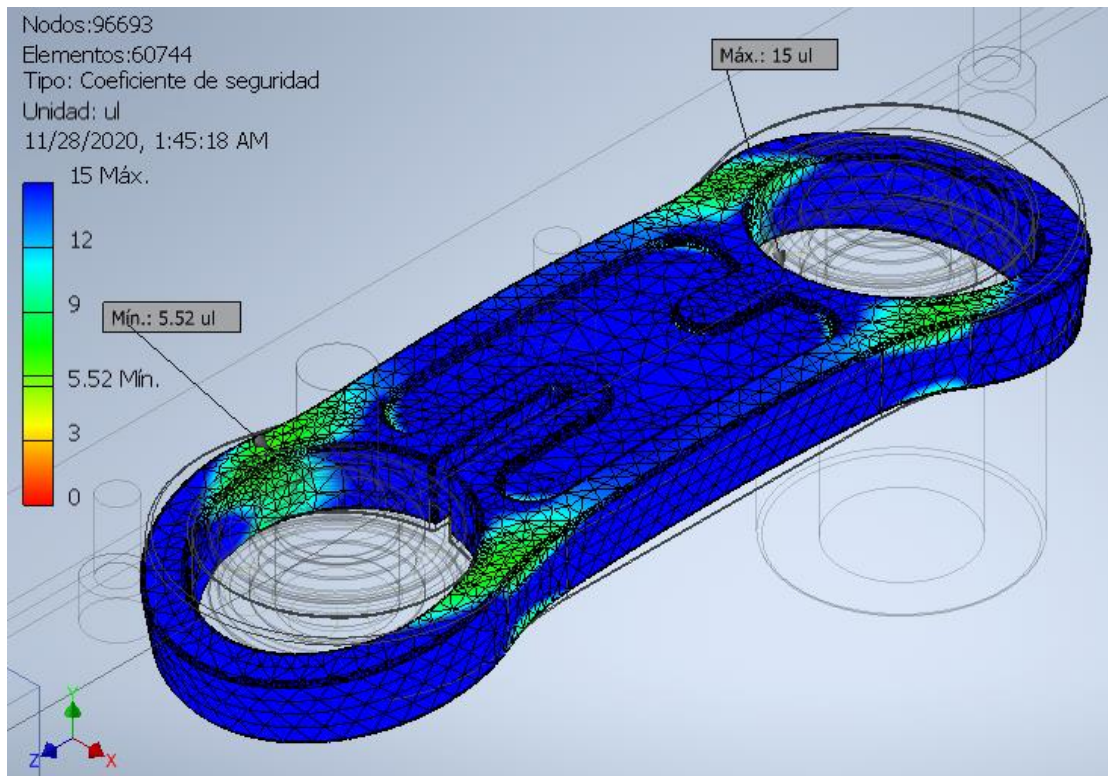


**Figura 41-3.** Convergencia de la simulación de esfuerzos de la biela sin carga aplicada en el mecanismo.

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

El coeficiente de seguridad de la biela durante el funcionamiento del prototipo sin una carga aplicada en el mecanismo, se puede observar en la figura 42-3, donde se observa el valor mínimo

de factor de seguridad de 5.52 ubicado donde indica la figura. Por tanto, aún se puede decir que éste elemento no falla durante el encendido de la máquina.



**Figura 42-3.** Resultados del coeficiente de seguridad en la biela en funcionamiento en vacío.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

### 3.5.12.3 Riel-Pasador (Funcionamiento en vacío)

Es necesario realizar el análisis de esfuerzos en el ensamble del Riel y el pasador debido, a que en el riel se debe realizar una perforación para poder roscar el pasador y esto puede debilitar estructuralmente al riel y también para dimensionar el diámetro del pasador garantizando su correcto funcionamiento.

Los materiales que conforman estos elementos son los que se ven la siguiente tabla.

**Tabla 11-3.** Materiales del ensamble Riel y pasador

Nombre	Acero inoxidable	
<b>General</b>	Densidad de masa	8 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	250 MPa
	Resistencia máxima a tracción	540 MPa
<b>Tensión</b>	Módulo de Young	193 GPa

	Coeficiente de Poisson	0.3 su
	Módulo cortante	74.2308 GPa
<b>Nombre(s) de pieza</b>	railop.ipt	
<b>Nombre</b>	<b>Acero, alta resistencia, aleación baja</b>	
<b>General</b>	Densidad de masa	7.85 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	275.8 MPa
	Resistencia máxima a tracción	448 MPa
<b>Tensión</b>	Módulo de Young	200 GPa
	Coeficiente de Poisson	0.287 su
	Módulo cortante	77.7001 GPa
<b>Nombre(s) de pieza</b>	PASADOR.ipt	

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

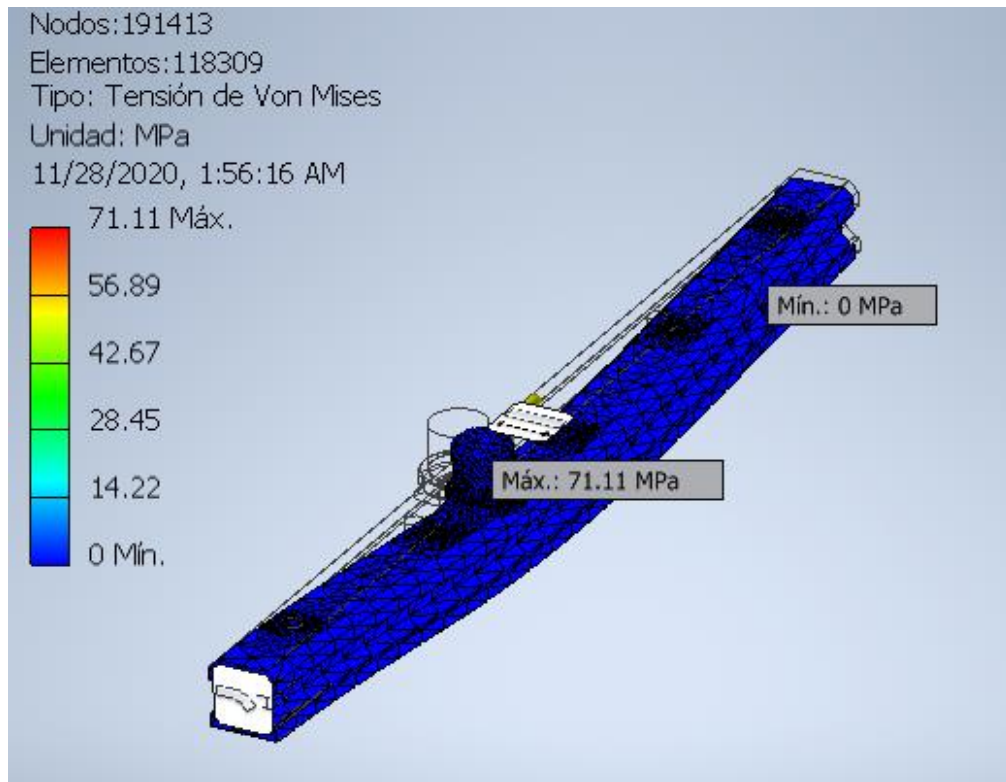
Las fuerzas involucradas aquí son las que se ven en la tabla 12-3.

**Tabla 12-3.** Fuerzas aplicadas al ensamble del riel y pasador.

Tipo de carga	Carga de rodamientos
<b>Magnitud</b>	580.246 N
<b>Vector X</b>	51.000 N
<b>Vector Y</b>	0.000 N
<b>Vector Z</b>	578.000 N

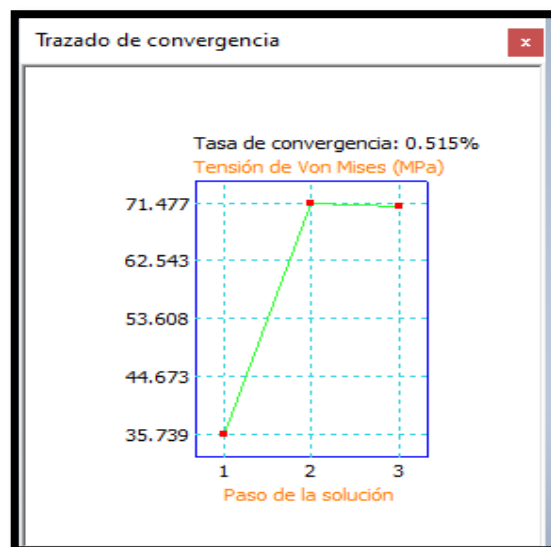
**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Al realizar la simulación de este elemento del mecanismo donde aún no se aplican cargas externas, se observa en la figura 43-3 donde se ve que hay un esfuerzo de Von Misses de 71.11 MPa, por tanto, este elemento soportará el encendido de la máquina. La malla que se usó aquí consta de 191413 nodos y 118309 elementos, esta malla es la adecuada ya que en la figura 44-3 se puede ver la tasa de convergencia a la que se llegó en la simulación.



**Figura 43-3.** Esfueros de Von Mises en el ensamble Riel-Pasador

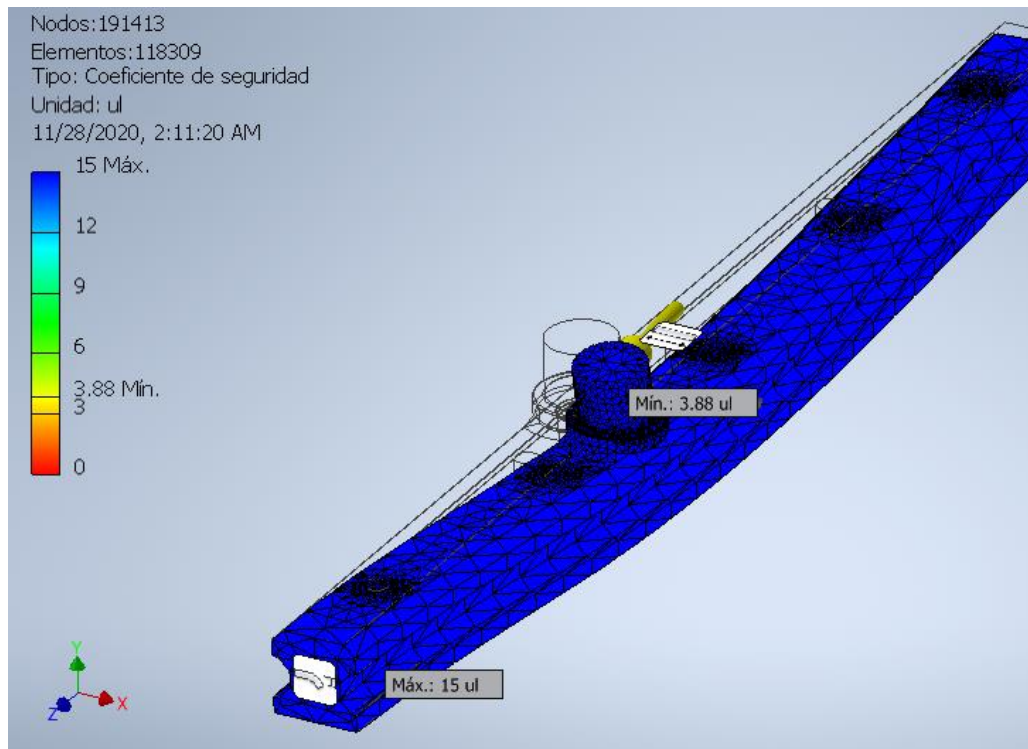
**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.



**Figura 44-3.** Tasa de convergencia del riel pasador

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Para asegurar la integridad del mecanismo se debe garantizar que éste ensamble no falle, por eso, que se debe observar el valor de coeficiente de seguridad. En este caso el valor mínimo es de 3.88, nuevamente garantizando el no fallo de estos componentes que son los que se mueven principalmente.



**Figura 45-3.** Coeficiente de seguridad del riel pasador sin carga en el mecanismo.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Hasta este punto los elementos móviles que conforman el mecanismo de la mesa vibradora tienen coeficientes de seguridad altos, lo que indica que el funcionamiento de la máquina es el adecuado durante el encendido de la máquina donde todavía no se ha aplicado alguna carga para realizar la soldadura por fricción.

A continuación, se presentan los resultados del análisis de esfuerzos de los mismos elementos, pero ahora aplicando una carga la cual será la suficiente que haga que los coeficientes de seguridad de estos elementos se acerquen al valor de 2.

#### 3.5.12.4 Acople (*Funcionamiento con carga máxima permitida*)

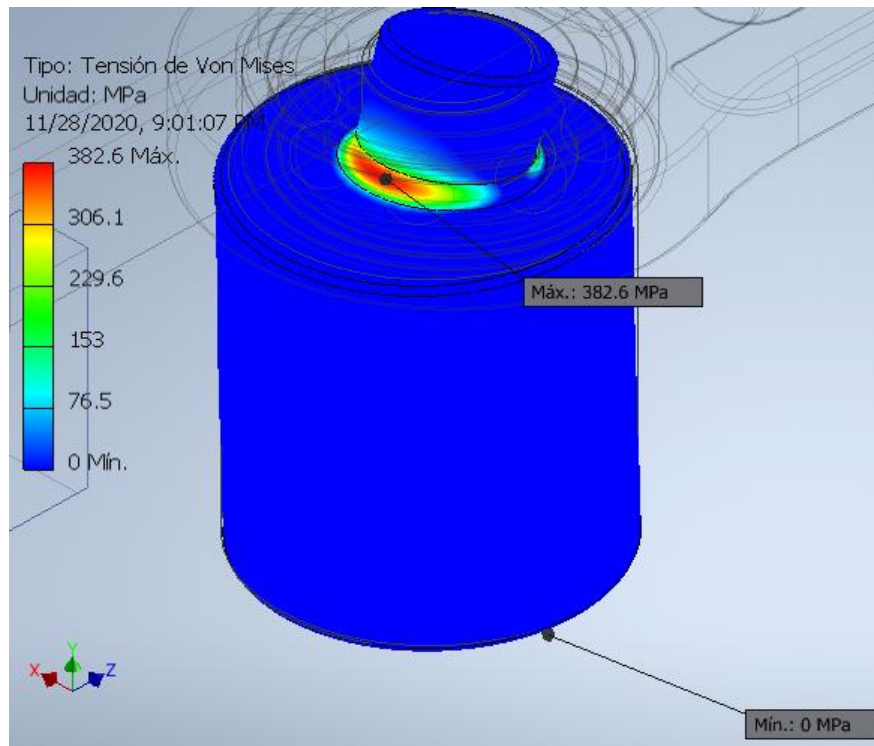
Se ha realizado el análisis de esfuerzos de los elementos que conforman el mecanismo vibrador de la máquina, y se lo ha hecho primero sin aplicar cargas en el riel. A continuación, se revisarán los esfuerzos presentes en los elementos cuando se aplica una carga, la carga aplicada es suficiente para que en los elementos del mecanismo exista un coeficiente de seguridad mayor o igual a 2, como se observan en las siguientes figuras.

**Tabla 13-3.** Valores de carga presentes en el acople aplicada una carga de 900N en el riel

Tipo de carga	Fuerza remota
Magnitud	1211.642 N
Vector X	-4.233 N
Vector Y	3.051 N
Vector Z	-1211.631 N
Punto remoto X	267.635 mm
Punto remoto Y	-237.762 mm
Punto remoto Z	182.455 mm

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En la tabla anterior se indican las fuerzas presentes en el acople debido al funcionamiento del mecanismo con una carga aplicada sobre el riel que corresponde a un valor de 900N, esta carga sería el valor máximo que se puede aplicar en la máquina para poder realizar la soldadura por fricción. Por tanto, en la imagen 46-3 se ven los esfuerzos de Von Mises presentes en el acople, donde el valor máximo es de 382.6 MPa y el valor mínimo es de 0 MPa.

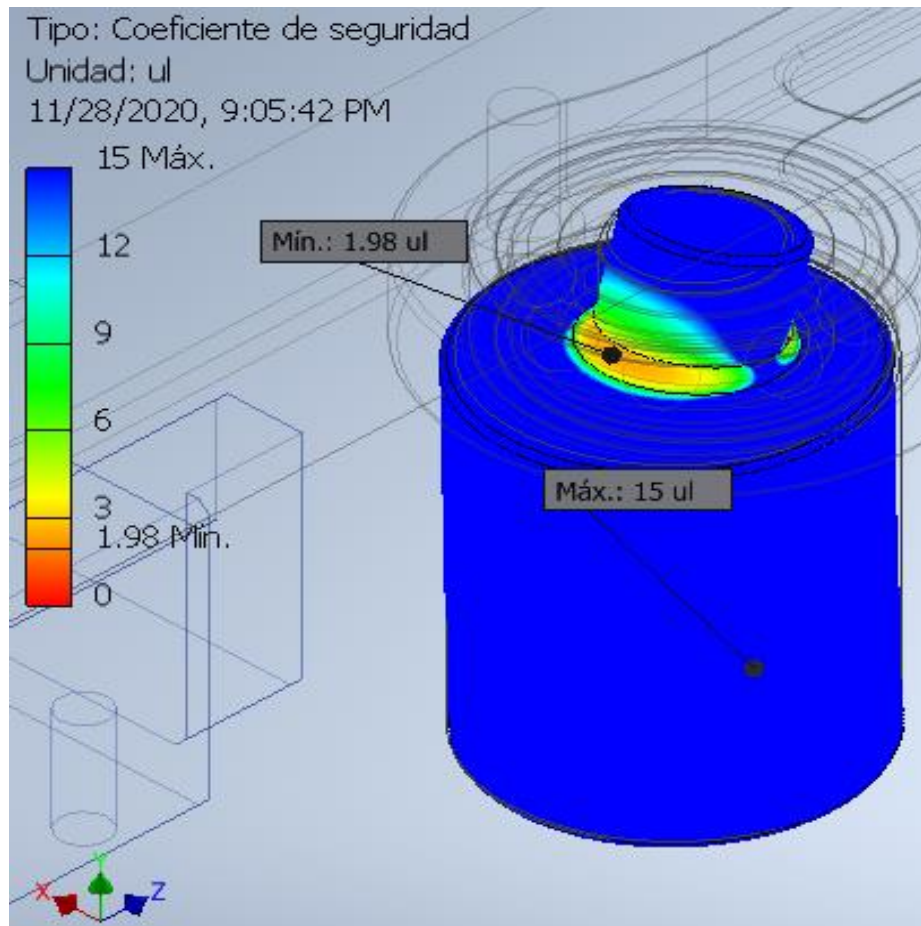


**Figura 46-3.** Esfuerzo de Von Mises en el acople con carga aplicada en el riel

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Luego se tienen que el valor mínimo de coeficiente de seguridad en éste elemento es de 1.98, un valor muy cercano a 2, por tanto, se puede considerar aceptable este valor. La

ubicación donde se encuentra el factor de seguridad más bajo se observa en la figura 47-3.



**Figura 47-3.** Coeficiente de seguridad del acople con carga aplicada en el acople.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Cabe recalcar que se utilizó el mismo material para este nuevo análisis, además del mismo mallado y el mismo criterio de convergencia, debido a que solamente cambian los valores de las fuerzas.

### 3.5.12.5 Biela (Funcionamiento con carga máxima permitida)

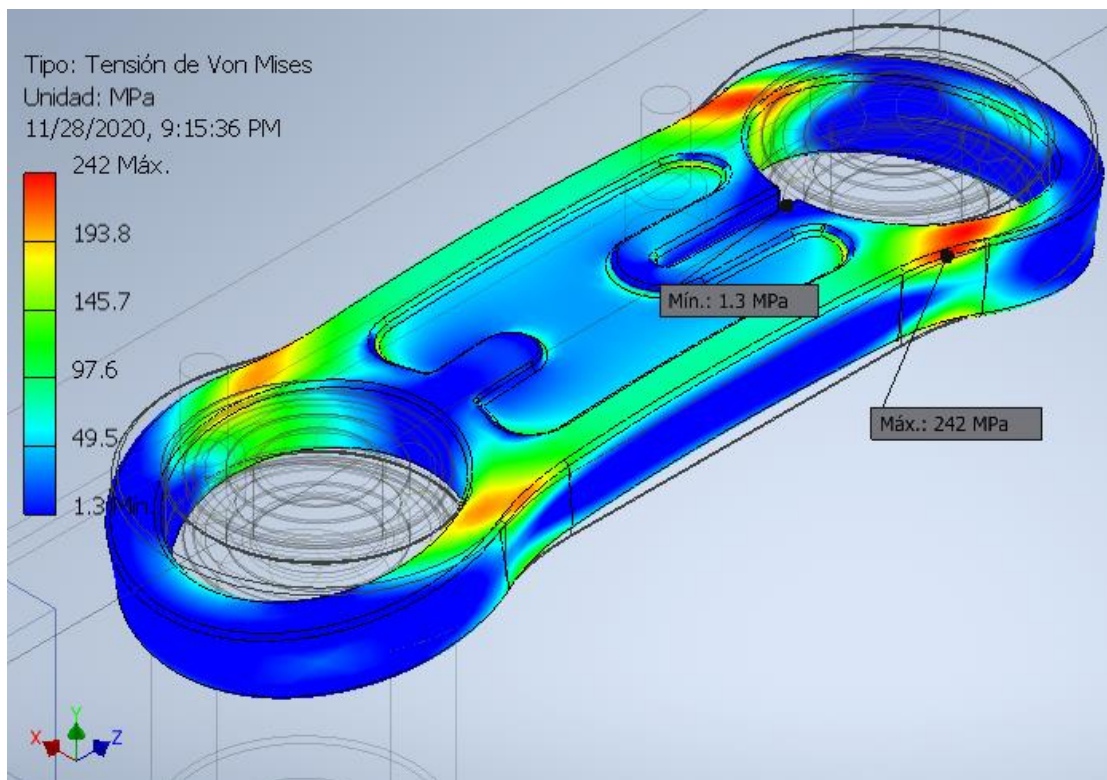
La tabla a continuación indica, las fuerzas máximas presentes en la biela, debido al funcionamiento del mecanismo cuando se aplica una carga de 900 N en riel del prototipo

**Tabla 14-3.** Fuerzas presentes en la biela con una carga aplicada en el riel

Tipo de carga	Fuerza remota	Fuerza remota 2	Momento 1	Momento 2
Magnitud	1188.896 N	1060.107 N	18808.219 N mm	19313.691 N mm
Vector X	-2.148 N	-3.829 N	-18807.957 N mm	19313.556 N mm
Vector Y	1.802 N	-0.216 N	0.000 N mm	0.000 N mm
Vector Z	-1188.893 N	1060.100 N	-99.261 N mm	72.174 N mm
Punto remoto X	267.818 mm	267.635 mm		
Punto remoto Y	-198.262 mm	-198.262 mm		
Punto remoto Z	184.446 mm	259.446 mm		

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En, éstas fuerzas hacen que se generen los esfuerzos que se ven en la figura 48-3, siendo estos los esfuerzos de Von Mises, donde su valor máximo es de 242 MPa y mínimo de 1.3 MPa ubicados donde se puede observar en la figura mencionada.

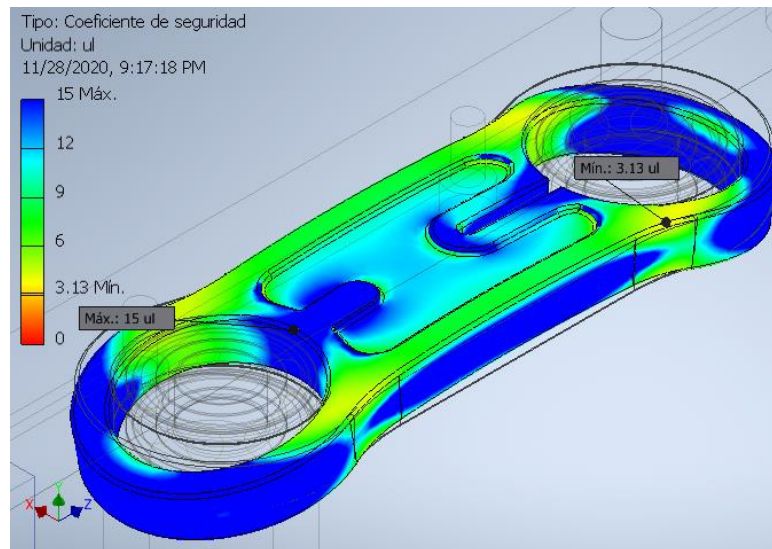


**Figura 48-3.** Esfuerzo de Von Mises en la biela con carga aplicada en el riel del mecanismo.

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En la biela del mecanismo se puede encontrar un valor de factor de seguridad mínimo de 3.13, siendo un valor adecuado para garantizar el funcionamiento de éste elemento, la ubicación de este valor se puede ver en a figura 49-3.





**Figura 49-3.** Coeficiente de seguridad en la biela con carga aplicada en el riel del mecanismo.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Estas simulaciones de esfuerzos se las realizó con el mismo material y mallado de este elemento, pero sin la carga aplicada en el riel del mecanismo debido a que sólo se cambian las fuerzas máximas presentes en él.

### 3.5.12.6 Riel-Pasador (Funcionamiento con carga máxima permitida)

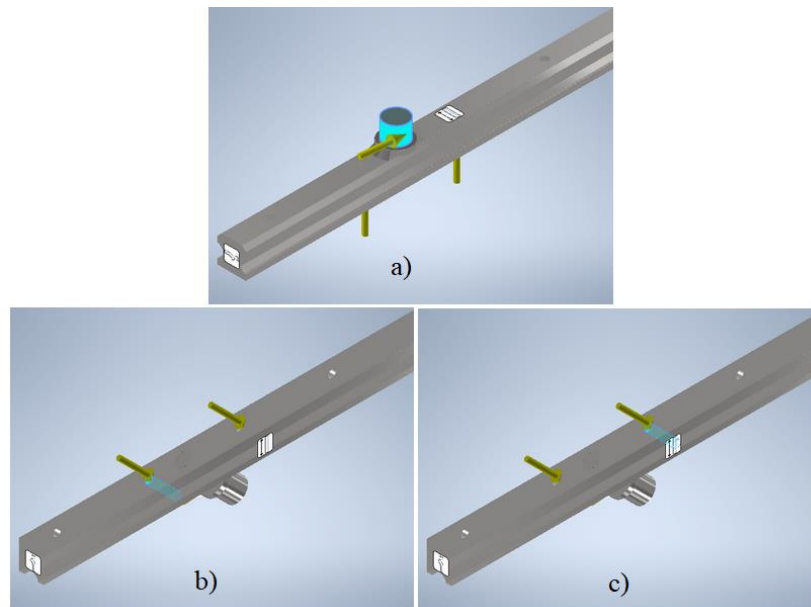
Otro elemento importante en el mecanismo es el ensamble del riel con el pasador, debido a que se debe hacer una perforación en el riel para insertar el pasador que luego éste formará el par de rotación con la biela mediante un rodamiento, se debe hacer el análisis de tensión de este conjunto, para determinar si soportará las fuerzas existentes durante el funcionamiento del prototipo cuando es aplicada una fuerza de 900N.

**Tabla 15-3.** Fuerzas presentes en el ensamble del riel y el pasador cuando se aplica una carga de 900 N en el riel.

Fuerza 1		Fuerza 2		Carga de rodamiento	
Tipo de carga	Fuerza	Tipo de carga	Fuerza	Tipo de carga	Carga de rodamientos
Magnitud	450.000 N	Magnitud	450.000 N	Magnitud	1076.641 N
Vector X	0.000 N	Vector X	0.000 N	Vector X	93.650 N
Vector Y	450.000 N	Vector Y	450.000 N	Vector Y	-0.190 N
Vector Z	0.000 N	Vector Z	0.000 N	Vector Z	-1072.560 N

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

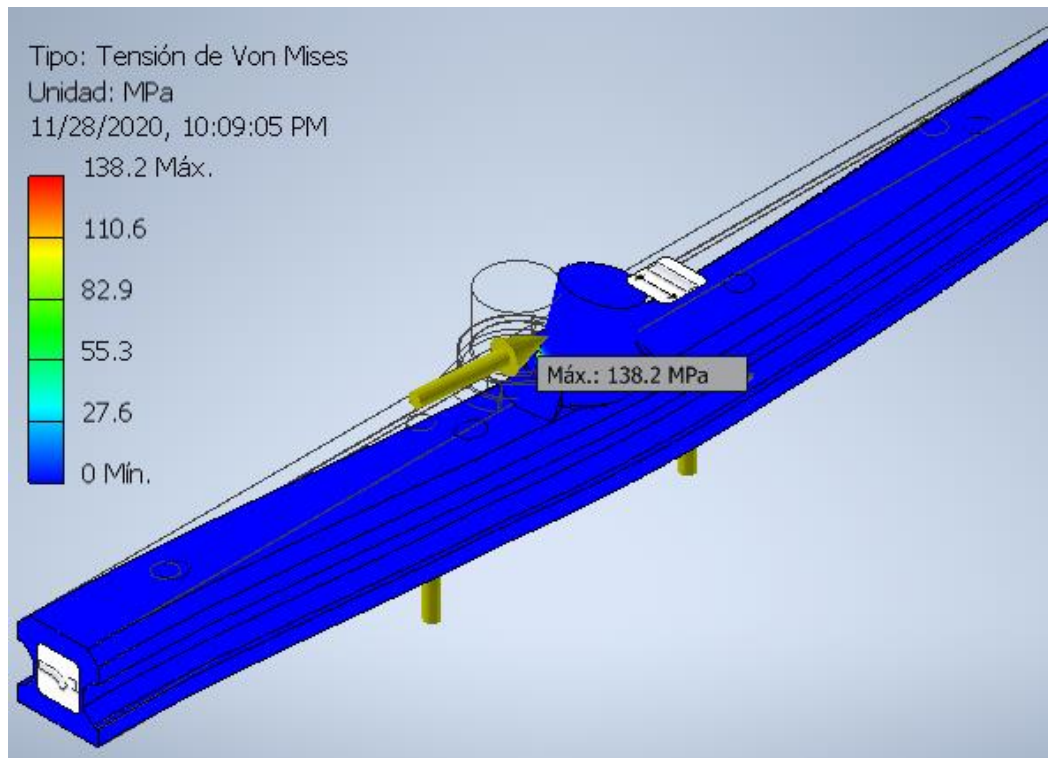
La tabla 15-3, indica los valores de las fuerzas presentes en el ensamble de riel y el pasador, donde las fuerzas 1 y 2 son las cargas aplicadas en el riel, que es la fuerza máxima que se puede aplicar para poder hacer la soldadura por fricción. La carga de rodamientos es la fuerza que ejerce la biela sobre el pasador mediante un rodamiento que es usado para reducir al mínimo la fricción en el par de rotación en esta unión, este valor de carga es indicada desde la simulación dinámica de Inventor.



**Figura 50-3.** Ubicación de las fuerzas en el ensamble riel-pasador. a) Carga de rodamiento, b) Fuerza 1, c) Fuerza 2.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En la figura 50-3 se observan las caras donde se aplican las fuerzas presentes es esta parte del mecanismo, las caras azules que resalan en las imágenes son dichas caras, en la figura 65a, la carga del rodamiento debido al funcionamiento del mecanismo, las figuras 65b y 65c indican las fuerzas 1 y 2, que son fuerzas de 450N cada una, sumando así 900N de carga total y están aplicadas en esas zonas azules debido a que la fuerza de contacto entre los materiales a soldar se encuentra en una pequeña mesa que se atornilla al riel transmitiendo así la carga aplicada durante la soldadura.

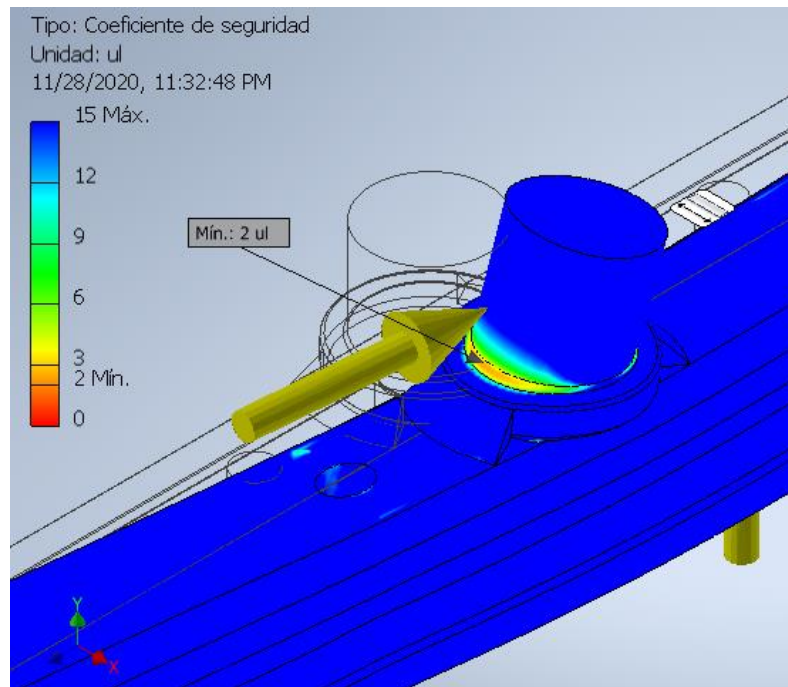


**Figura 51-3.** Esfuerzo de Von Mises en el ensamble del riel y pasador.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

El esfuerzo máximo de 138.2 MPa se encuentra en el pasador, como se observa en la figura 51-3, y en el riel existen tensiones muy bajas que no afectan la integridad de éste, por tanto, la zona de interés debido al mayor esfuerzo se encuentra en el pasador.

Se puede ver en la figura 52-3 la ubicación y valor del coeficiente de seguridad más bajo durante la operación del mecanismo, éste valor es de 2, estando dentro del criterio de diseño que se estableció para el diseño de los componentes.



**Figura 52-3.** Coeficiente de seguridad en el ensamble riel-pasador durante una carga de 900N sobre el riel del mecanismo.

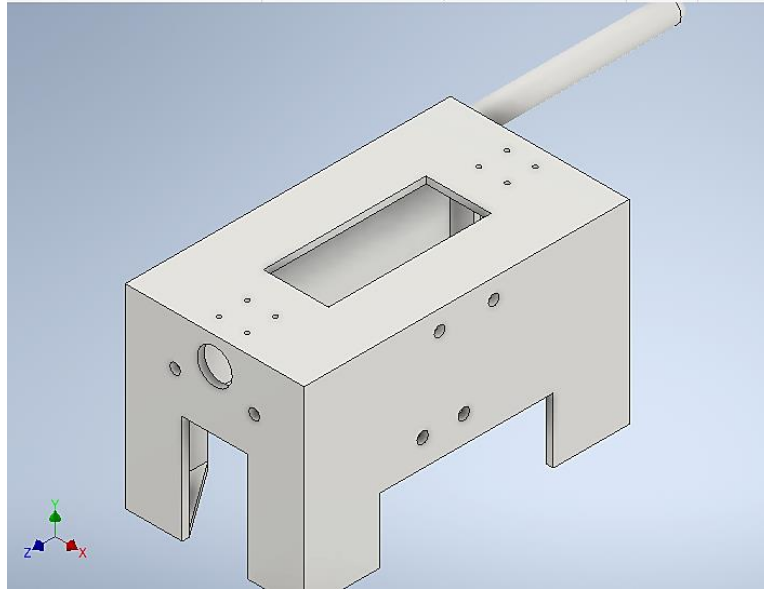
**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En el análisis realizado a estos componentes se establece que los elementos con el menor factor de seguridad son: el acople excéntrico y el pasador, por lo que se consideró que la carga máxima que se puede aplicar en la máquina para realizar la soldadura por fricción lineal es de 900N, ya que se adoptó un factor de seguridad igual o mayor a 2, garantizando que no exista falla debido a plastificación del material durante la operación del prototipo.

Para conocer el detalle de las dimensiones de los elementos que conforman el mecanismo del prototipo, los planos de cada elemento se encuentran en la sección de anexos.

### 3.5.12.7 Mesa de la máquina (Análisis Modal)

Se realizaron varios modelos CAD en el software Inventor de Autodesk, de la estructura que soportará los elementos que conformarán la máquina, pero se seleccionó la estructura más robusta y más fácil de construir. Por lo cual se llegó al modelo que se observa en la siguiente figura.



**Figura 53-3.** Mesa estructural de la máquina

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Las dimensiones de la estructura de la mesa se encuentran detalladas en los planos de construcción de la máquina, que se las puede encontrar la sección de anexos.

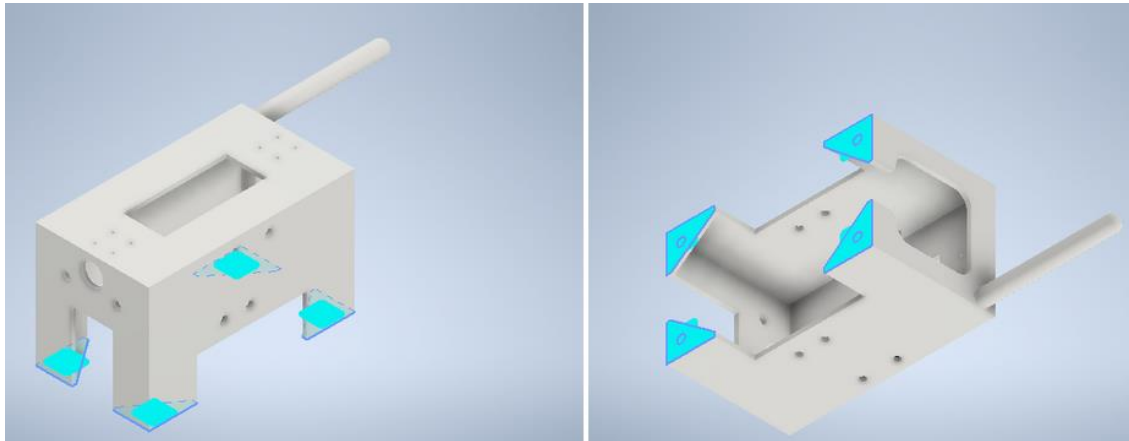
La característica principal que debe cumplir este elemento, es que su frecuencia natural, no debe coincidir o estar cerca de la frecuencia de operación de la máquina, ya que, al hacerlo, entraría en resonancia comprometiendo la integridad de la máquina.

Se realizó el análisis modal de frecuencias naturales de este elemento, en el software Inventor, en donde se utilizó la información indicada en la siguiente tabla.

**Tabla 16-3.** Características del material

Nombre	Acero, forjado	
General	Densidad de masa	7.85 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	250 MPa
	Resistencia máxima a tracción	300 MPa
Tensión	Módulo de Young	210 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.3 su
	Módulo cortante	80.7692 GPa
Nombre(s) de pieza	Mesa.ipt	

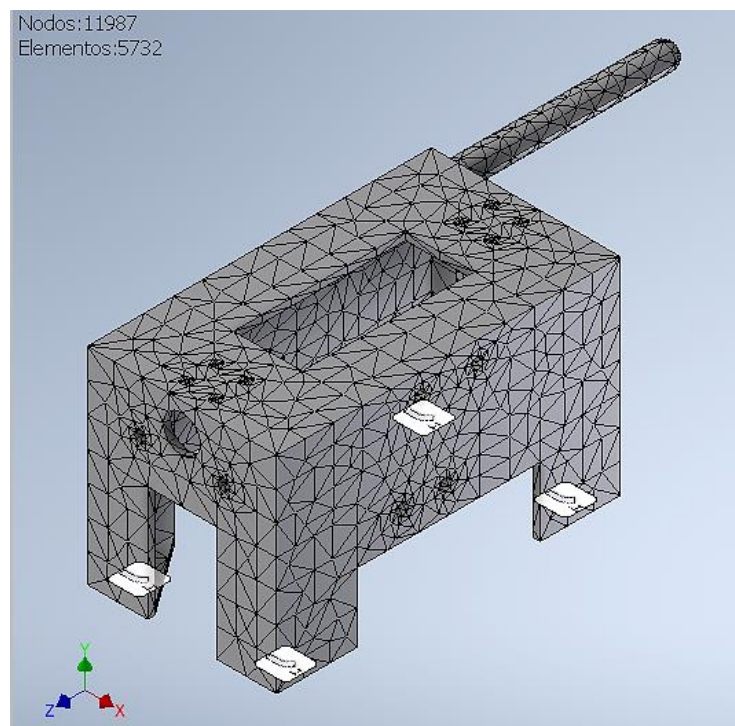
**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.



**Figura 54-3.** Restricciones del modelo

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En la figura 55-3 se, indican las caras del modelo que son fijas ya que es la parte de la máquina la cual se fijará a algún soporte para evitar el movimiento.



**Figura 55-3.** Mallado de la estructura de la mesa

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En la figura 55-3, se muestra el mallado del modelo y el número de elementos y nodos que lo conforman, el software recomienda este mallado y lo hace de forma automática, siendo el más

óptimo, tomando en cuenta la geometría del modelo y los recursos computacionales. La información del mallado se ve en la tabla 17-3.

**Tabla 17-3.** Configuración de la malla de la mesa estructural

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.08
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	Sí

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Obteniéndose los siguientes valores de frecuencias.

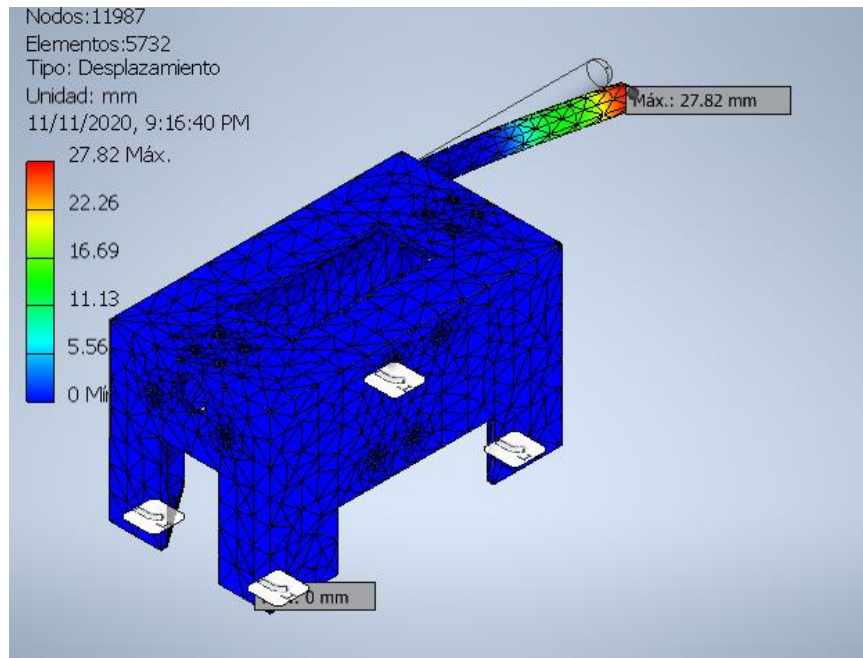
**Tabla 18-3.** Resultados de frecuencias naturales de la estructura de la máquina.

<b>F1</b>	323.37 Hz
<b>F2</b>	369.14 Hz
<b>F3</b>	676.18 Hz
<b>F4</b>	702.24 Hz
<b>F5</b>	970.03 Hz
<b>F6</b>	1407.59 Hz
<b>F7</b>	1412.80 Hz
<b>F8</b>	1598.91 Hz

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Se puede observar en la tabla 18-3, que el software entrega 8 diferentes frecuencias, que son las frecuencias naturales de la estructura, por tanto, éste sería el elemento adecuado para la máquina, debido a que su funcionamiento estaría en los 100 Hz establecidos para la vibración en la soldadura, asegurando la integridad de la máquina.

En la siguiente figura se puede ver el primero modo de falla debido a que, si la máquina alcanzará la primera frecuencia de vibración, empezaría a deformarse como se observa en la imagen.



**Figura 56-3.** Primer modo de falla debido a la primera frecuencia natural.

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

### 3.5.13 Construcción del prototipo de máquina para soldadura por fricción lineal de acrílico

Para la realización de la construcción del prototipo de la máquina para soldadura por fricción lineal, se encargó la construcción y ensamblaje a un taller mecánico de precisión situada en la ciudad en de Ambato, con los detalles de los elementos especificados en los planos que se encuentran en los anexos de la presente investigación.

#### 3.5.13.1 Materiales para la construcción

En la siguiente tabla se puede observar los elementos principales de la máquina que se deben construir para la fabricación del prototipo.

**Tabla 19-3.** Materiales usados en la construcción de la máquina de soldadura por fricción lineal.

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



<b>Guías</b>	Barra de Acero A36
<b>Mini mesa soporte para soldadura</b>	Aluminio

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

### 3.5.13.2 Construcción mecánica de la máquina

Se obtuvieron los elementos que se pueden encontrar en el mercado nacional 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. En base a estos elementos se construyen los otros componentes de la máquina.

Donde la estructura principal de la máquina denominado “mesa estructural”, se construyó en base a las dimensiones del motor. La forma de la estructura se puede ver la figura 57-3, donde fue necesario realizar un cepillado en la superficie superior de la mesa ya que, en esta cara se acoplarán los deslizadores y el riel, donde se debe evitar cualquier desviación superficial.



**Figura 57-3.** Mesa estructural de la máquina. Arriba: Vista superior. Abajo: Vista lateral derecha.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Luego se construyó el acople excéntrico, el pasador, que se realizaron en torno, luego la biela se extrajo de un compresor de aire para reducir costos y tiempos de fabricación, se procedió al ensamblaje de éstos componentes con el riel y los deslizadores, con la utilización de herramientas

de precisión, obteniendo así el mecanismo biela manivela que generará la vibración para la soldadura por fricción, esto se observa en la siguiente imagen.



**Figura 58-3.** Ensamble del mecanismo a la mesa estructural

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Luego se ensamblaron los componentes que se encargarán de aplicar las carga o fuerza de contacto para la soldadura el cual está formado por el soporte de gata, la gata hidráulica, la mordaza y una mini mesa que se emperna al riel del mecanismo.

La gata hidráulica de 2 toneladas de capacidad se calibró antes de ser montada en la máquina, debido a que se hicieron modificaciones en la gata hidráulica para que ésta opere de manera que el cilindro de la gata descienda. Éste proceso de calibración se lo hizo con la ayuda de la máquina universal Tinus Olsen de la ESPOCH (figura 59-3).



**Figura 59-3.** Ensamble del sistema de presión y sujeción.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

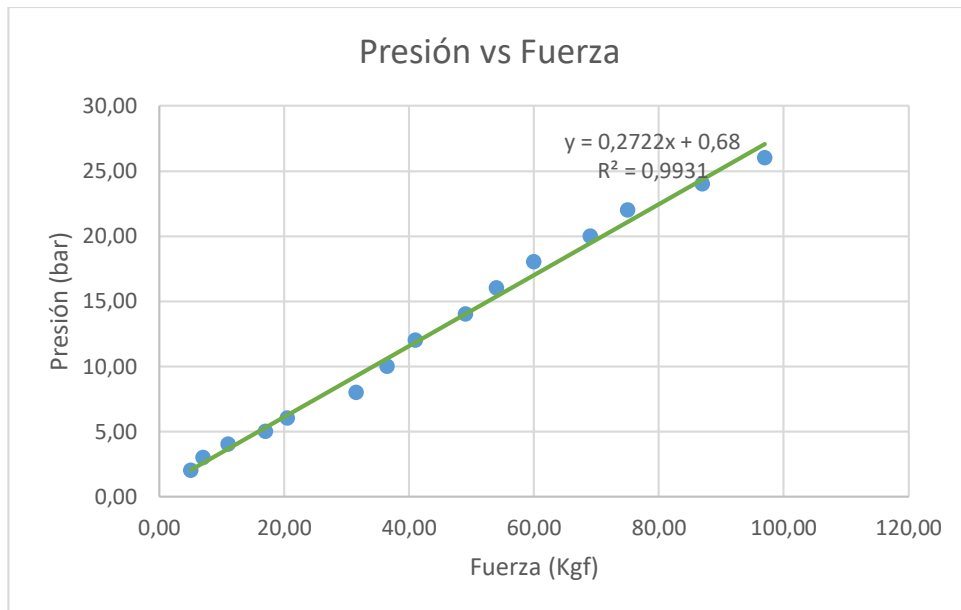
En el proceso de calibración se realizaron 4 mediciones de fuerza para una misma presión indicada en el manómetro, en un rango de presiones de 2 a 26 bares, los datos se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 20-3.** Registro de datos para la calibración de la gata hidráulica.

CARGA (Kgf)				Promedio	Presión (bar)	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual %
M1	M2	M3	M4					
4	4	6	6	5.00	2.00	1.15	0.23	23.09
6	6	8	8	7.00	3.00	1.15	0.16	16.50
10	10	12	12	11.00	4.00	1.15	0.10	10.50
16	18	18	16	17.00	5.00	1.15	0.07	6.79
18	20	22	22	20.50	6.00	1.73	0.08	8.45
30	30	32	34	31.50	8.00	1.73	0.05	5.50
34	36	38	38	36.50	10.00	1.73	0.05	4.75
38	40	42	44	41.00	12.00	2.31	0.06	5.63
48	50	48	50	49.00	14.00	1.15	0.02	2.36
52	54	56	54	54.00	16.00	1.15	0.02	2.14
58	60	60	62	60.00	18.00	1.15	0.02	1.92
68	66	72	70	69.00	20.00	2.31	0.03	3.35
72	74	78	76	75.00	22.00	2.31	0.03	3.08
84	86	90	88	87.00	24.00	2.31	0.03	2.65
94	96	100	98	97.00	26.00	2.31	0.02	2.38

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Los datos obtenidos se graficaron como se observa en la figura 60-3, donde se puede observar la línea y ecuación de tendencia. Con esta información se puede determinar la fuerza aplicada durante el proceso de soldadura.



**Figura 60-3.** Gráfico presión vs fuerza de la gata hidráulica para la calibración.

Fuente: Autor

Luego se procedió a instalar la gata hidráulica que será la encargada de generar la presión de contacto entre las piezas a unir.



**Figura 61-3.** Ensamblaje del sistema de presión y sujeción.

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En esta parte de la construcción ya se puede hacer pruebas del funcionamiento de mecanismo, se observó que el mecanismo no se trabó, tampoco existe calentamiento o sobrecalentamiento de los componentes. Pero se observó que al apagar el motor el mecanismo tarda alrededor de 6 segundos en detenerse por éste motivo es necesario implementar un sistema de frenado.

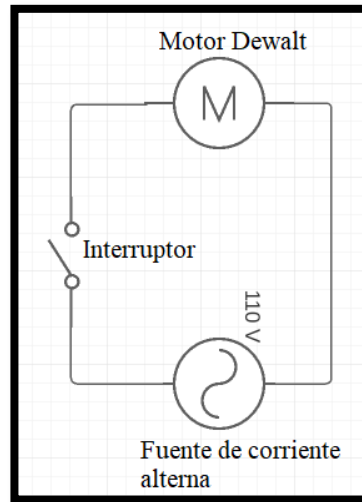


**Figura 62-3.** Elementos del sistema de frenado

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Se puede observar en la parte izquierda de la figura 62-3 la bomba de freno incorporada a la estructura y el cilindro esclavo de embrague (derecha de la figura 62-3), que recibirá el líquido de freno a través de una manguera, éste cilindro esclavo está conectado con una horquilla que tiene incorporada una zapata, que hace contacto con el acople excéntrico para detener el movimiento del motor cuando éste se apaga.

Para el control de encendido del motor es muy simple se realizó la incorporación de un interruptor para el encendido y apagado de la máquina, el esquema eléctrico se muestra en la siguiente figura.



**Figura 63-3.** Esquema eléctrico de conexión

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Luego se realizó el proceso de pintado y secado de la máquina, culminando el proceso de construcción.



**Figura 64-3.** Prototipo de máquina de soldadura por fricción lineal de acrílico.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Así se pudo obtener el primer prototipo de soldadura por fricción lineal para poder soldar acrílico que se observa en la figura 62-3, la disposición de la mini mesa de soporte y la

mordaza están en posición perpendicular para poder realizar soldaduras de esta forma, como se puede ver en la siguiente figura.



**Figura 65-3.** Forma de soldadura que se puede obtener con el prototipo de la máquina de la soldadura por fricción lineal.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

## CAPÍTULO IV

### 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados de la soldadura que se puede obtener con el prototipo de máquina de soldadura por fricción lineal de acrílico

#### 4.1 Resultados

##### 4.1.1 *Parámetros de soldadura*

La soldadura que se puede obtener con la máquina propuesta se ve en la siguiente figura, se evidencia la existencia de material saliente como resultado de calentamiento del material debido a la fricción y la presión existente entre las superficies de las piezas a unir, debido a esto existe un acortamiento de material.



**Figura 1-4.** Resultado de la soldadura.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Los parámetros con los que se puede hacer la soldadura por fricción con el prototipo de máquina, se obtuvieron realizando varias pruebas donde se variaron la presión de contacto, el área de contacto y el tiempo de soldadura y los parámetros que no se pueden variar en la máquina es la frecuencia y amplitud de movimiento ya que son fijas.

Se recolectó la información de las pruebas de soldadura y se las presenta en la tabla 1-4. 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.

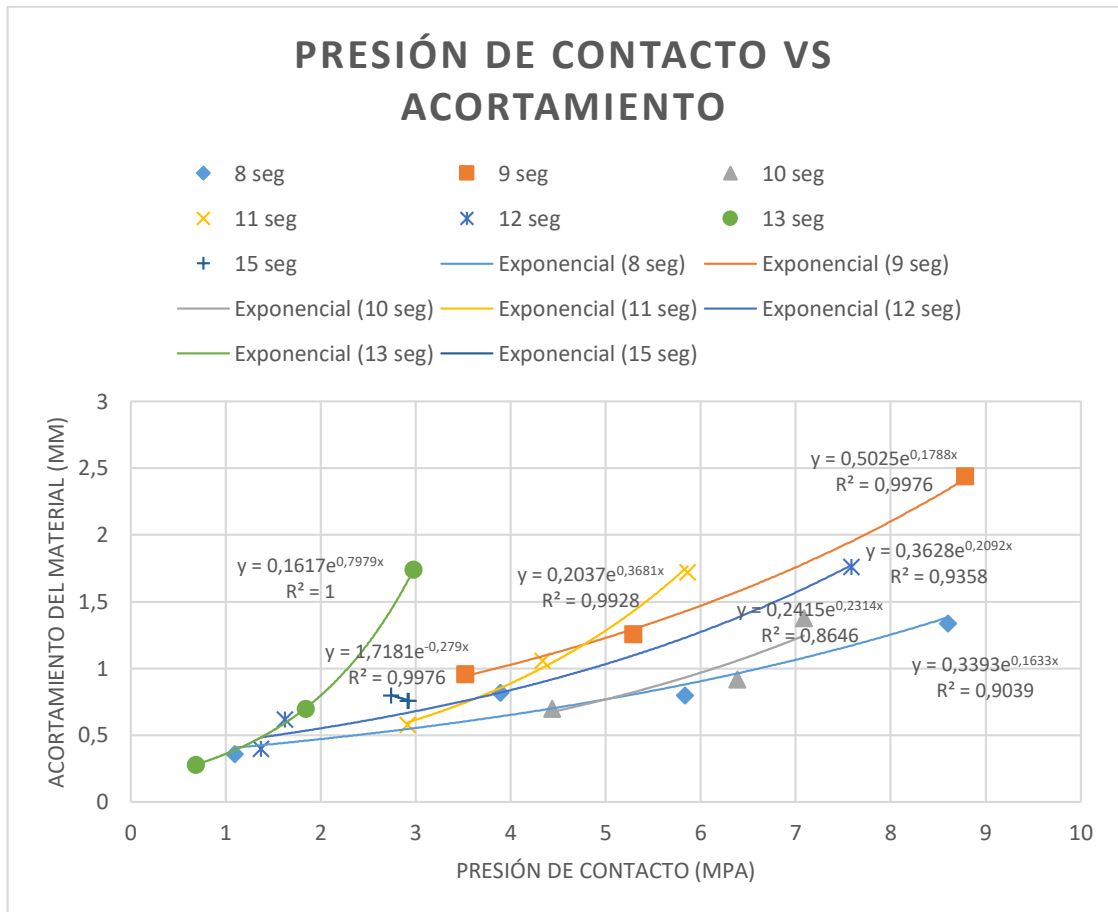
Durante las pruebas se midió el tiempo de la soldadura, éste tiempo se tomó en cuenta desde el momento en que las piezas entran en contacto (Fase I de la soldadura), hasta detener el movimiento (Fase III de la soldadura), se midió también la longitud final de los materiales con lo cual se puede calcular el acortamiento del material, que representará el material expulsado debido al ablandamiento del material y la presión de contacto en la zona de soldadura, además se indica si la soldadura tuvo éxito o no.

**Tabla 1-4.** Magnitudes medidas en las pruebas de soldadura por fricción lineal.

PRUEBAS DE SOLDADURA											
Tamaño de los materiales				Información de la máquina		Parámetros de la soldadura					
Espesor (mm)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Área de contacto (mm <sup>2</sup> )	Presión Manómetro (MPa)	Área cilindro gata hidráulica (mm <sup>2</sup> )	Fuerza de contacto (N)	Presión de contacto (MPa)	Tiempo de soldadura (s)	Largo final (mm)	Acortamiento (mm)	Soldadura
6	34.5	58.62	207	0.8	283.53	226.824	1.09576812	8	58.26	0.36	No
3.1	28.2	37.68	87.42	1.2	283.53	340.236	3.8919698	8	36.86	0.82	Si
4.16	11.68	38.14	48.5888	1	283.53	283.53	5.83529538	8	37.34	0.8	Si
4.16	11.88	37.24	49.4208	1.5	283.53	425.295	8.60558712	8	35.9	1.34	Si
3	21.48	35.1	64.44	0.8	283.53	226.824	3.51992551	9	34.14	0.96	Si
3	21.44	34.72	64.32	1.2	283.53	340.236	5.28973881	9	33.46	1.26	Si
3.1	26.12	40	80.972	2.5	284.53	711.325	8.78482685	9	37.56	2.44	Si
3.1	24.9	36.2	77.19	1.2	285.53	342.636	4.43886514	10	35.5	0.7	Si
3	22.2	48	66.6	1.5	283.53	425.295	6.38581081	10	47.08	0.92	Si
3	20	41.58	60	1.5	283.53	425.295	7.08825	10	40.2	1.38	Si
4.16	11.68	39.8	48.5888	0.5	283.53	141.765	2.91764769	11	39.22	0.58	Si
3	21.8	45.38	65.4	1	283.53	283.53	4.3353211	11	44.32	1.06	Si
4.16	11.62	40.3	48.3392	1	283.53	283.53	5.86542599	11	38.58	1.72	Si
3	28.62	43.7	85.86	2	283.53	567.06	6.6044724	11	41.98	1.72	Si
6	34.5	60.4	207	1	283.53	283.53	1.36971014	12	60	0.4	Si
3.1	28.2	27.82	87.42	0.5	283.53	141.765	1.62165408	12	27.2	0.62	Si

3	22.42	42.8	67.26	1.8	283.53	510.354	7.58777877	12	41.04	1.76	Si
6	34.5	59.7	207	0.5	283.53	141.765	0.68485507	13	59.42	0.28	No
3.1	24.6	48.14	76.26	0.8	283.53	226.824	2.9743509	13	46.4	1.74	Si
3.1	24.8	40.5	76.88	0.5	283.53	141.765	1.84397763	13	39.8	0.7	Si
6	34.5	60.4	207	2	283.53	567.06	2.73942029	15	59.6	0.8	Si
4.16	11.68	37.8	48.5888	0.5	284.53	142.265	2.92793813	15	37.04	0.76	Si
4.16	11.68	42.4	48.5888	0.5	283.53	141.765	2.91764769	15	41.64	0.76	Si

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.



**Figura 2-4.** Gráfico de la presión de contacto vs acortamiento del material.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

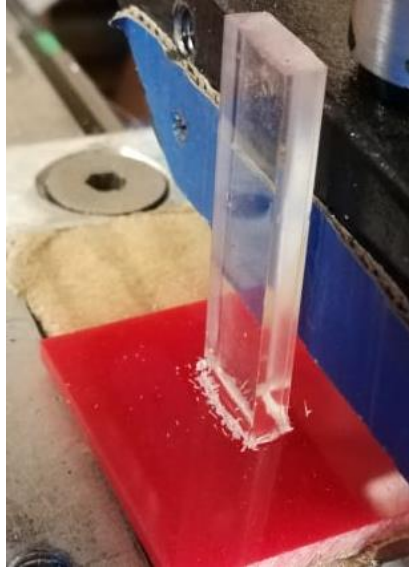
Se realizó un gráfico de puntos dispersos que relaciona la presión de contacto y el acortamiento de los materiales también con tiempos de soldadura diferentes para comprender sus efectos (figura 2-4), recordando que se mantiene constante la frecuencia y amplitud de la vibración, en donde se observa que 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.

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 Control de la soldadura

Para obtener soldaduras por fricción lineal con el prototipo de soldadura por fricción lineal de la presente investigación, se puede realizar controlando la presión y el tiempo de soldaduras si no

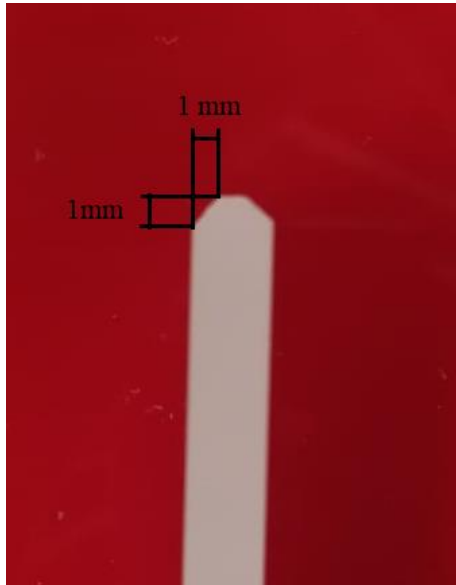
es importante el acortamiento del material soldado o la estética del acabado, para ello se recomienda utilizar presiones de contacto superiores a 1,10 MPa y tiempos de soldadura mayores a 8 segundos, recordando que la presión de contacto no es la misma presión que indica el manómetro, pero ésta se puede determinar mediante la fórmula  $P=F/A$ . El resultado con este tipo de soldadura se puede ver en la siguiente figura, donde se observa que hay una cantidad de material expulsado considerable y visible.



**Figura 3-4.** Obtención de soldadura con presión de contacto de 7Mpa y tiempo de soldadura de 9 seg.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

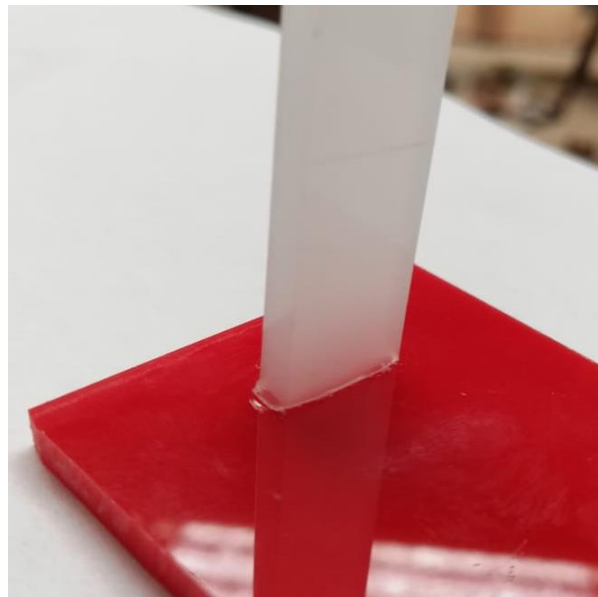
La otra forma que se puede realizar la soldadura en esta máquina es controlando el acortamiento que se desean del material, para ello se debe realizar una marcación en una de las placas para saber cuándo acabar la soldadura, en este modo no es importante la presión y el tiempo de soldadura lo que se necesita en el proceso es obtener el acortamiento deseado.



**Figura 4-4.** Chaflanado de la placa de acrílico a soldar para controlar el acortamiento en la soldadura.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Para el control de acortamiento de las piezas de acrílico y obtener un mejor acabado de la soldadura se recomienda realizar chaflanados con acortamientos entre 0,5 mm a 1 mm (figura 4-4), para tener mejor estética en la zona de unión como se observa en la figura 5-4, donde se ve que se tiene menos material expulsado en la soldadura.



**Figura 4-4.** Acabado de soldadura con control de acortamiento mediante un chaflanado de 1 mm x 1 mm.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Adicionalmente cabe indicar que en las soldaduras que se realizaron en el presente trabajo se incorporaron en las mordazas trozos de cartón como se observa en la figura 5-4, con el fin de que no se rayen o se deformen en exceso las placas de acrílico que se van a soldar debido al ajuste de los pernos para fijar el acrílico con las mordazas.

#### **4.1.3 Resistencia de la soldadura**

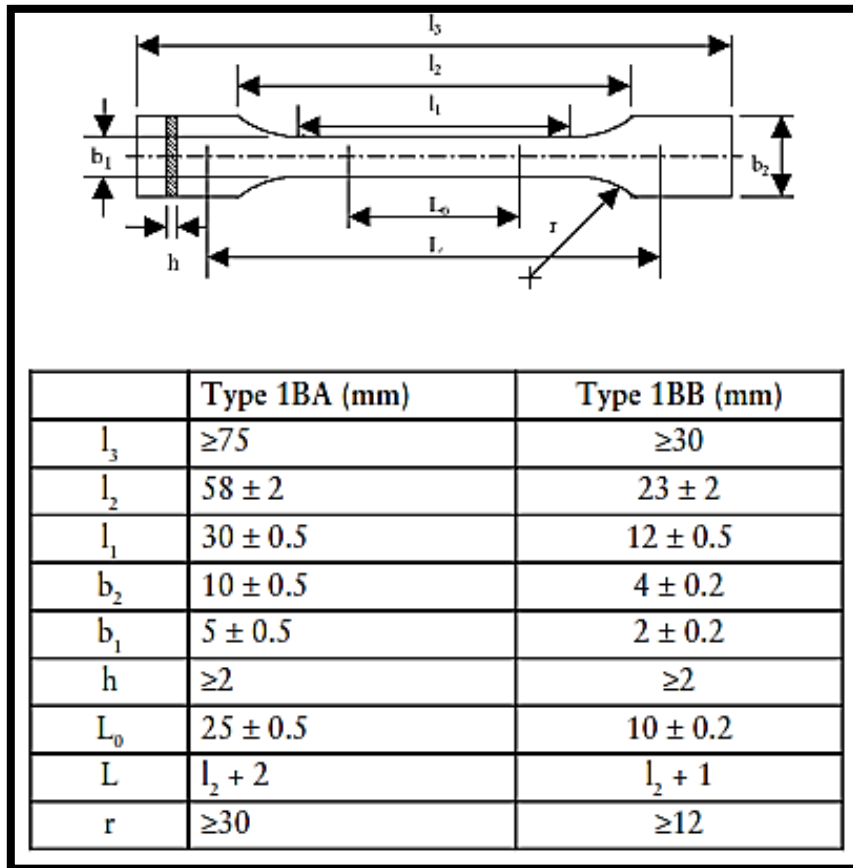
Una vez que se verificó que se pueden realizar soldaduras exitosas con el prototipo de máquina de soldadura por fricción lineal de acrílicos, se debe probar la calidad de soldadura que se puede realizar con ella. Para ello se realizaron pruebas de tracción y de impacto, no se realizaron pruebas de flexión 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 cantidad de probetas usadas para los ensayos quedó a consideración del investigador, ya que por el planteamiento y objetivo de la investigación se usó una muestra no probabilística, quedando determinada la cantidad de probetas por recomendaciones de las normas utilizadas.

Las probetas soldadas con la máquina concebida se obtuvieron usando parámetros similares mostrados en la tabla 1-4, se usaron presiones de contacto entre 1,5 MPa a 8 MPa con tiempos entre 8 a 13 segundos.

##### **4.1.3.1 Ensayo de tracción**

En los ensayos de tracción se realizaron a 5 probetas, ya que es el número mínimo de probetas recomendadas por la norma ISO 527-1, las medidas usadas son del tipo 1BA (fig. 6-4), debido a que es el tamaño máximo de soldadura de materiales que se puede realizar con la máxima.

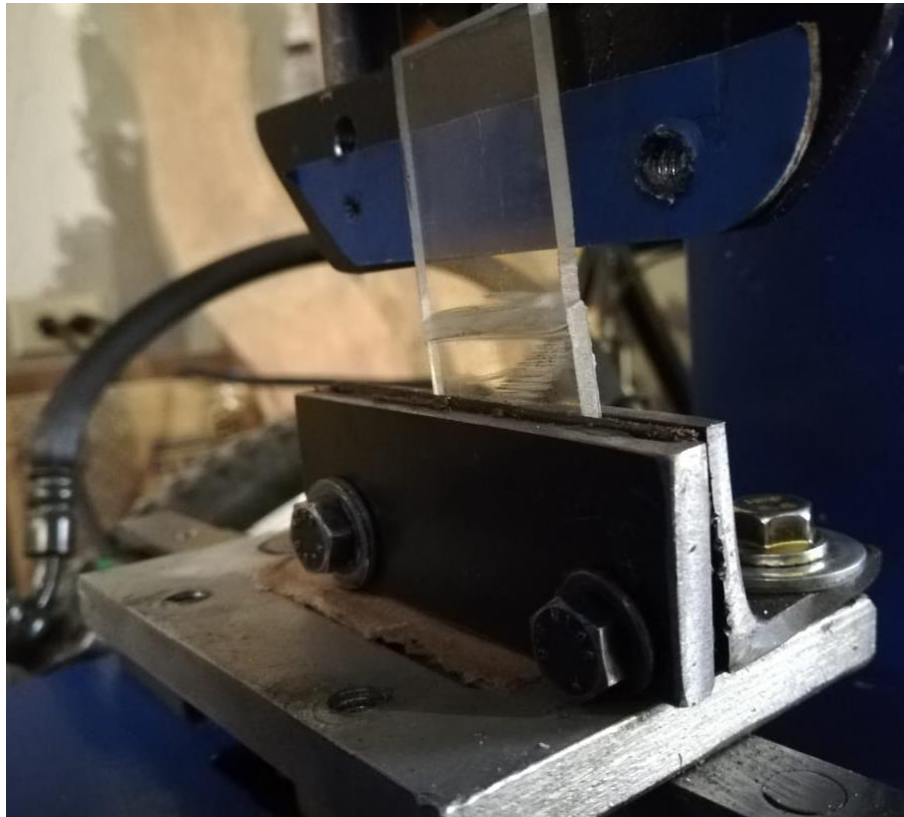


**Figura 5-4.** Dimensiones para las probetas de ensayo a tracción.

Fuente: HANDBOOK OF POLYMER TESTING (BROWN, 2002)

Para obtener las probetas unidas mediante soldadura por fricción lineal, fue necesario implementar una nueva mordaza que se acopla a la mini mesa (figura 7-4), y así poder realizar la unión de las placas de acrílico de forma paralela y colineal, como se puede observar en la siguiente imagen. Luego estas placas de acrílico se cortaron mediante laser para obtener dimensiones más precisas.





**Figura 6-4.** Forma de soldadura para obtener las probetas.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En estas pruebas se realizaron 5 probetas de material de acrílico de material base (Sin soldar), 5 probetas soldadas por fricción lineal y 5 probetas unidas con pegamento a base de cianoacrilato comúnmente conocido en el mercado nacional como “Pegamento Brujita”.

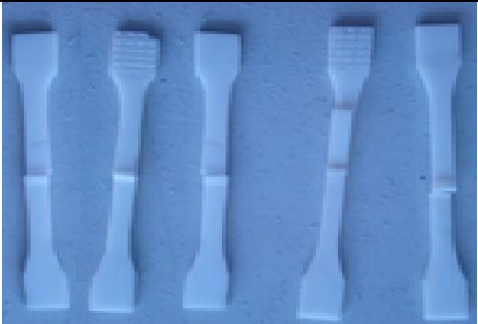


**Figura 7-4.** Probetas para las pruebas

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.


En la figura 8-4 se observan las probetas realizadas para las pruebas de tracción, la probeta de color blanca es la probeta soldada por fricción y la transparente es la probeta de material base de acrílico, las probetas unidas mediante cianoacrilato se desprendieron al momento de montarlas en la máquina de ensayos a tracción y no se pudo obtener datos de estas probetas en este ensayo.

**Tabla 2-4.** Datos obtenidos de los ensayos a tracción de las probetas unidas por soldadura por fricción lineal.

Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Calculado) (MPa)	Desplazamiento	% Elongación (Calculado)
				Ancho	Espesor					
1	1804337529120201023-ETP 01-1	22.1	55.1	4.69	2.08	300.00	30.75	227.19	6.768	13.54
2	1804337529120201023-ETP 01-2	22.1	55.1	4.72	2.1	250.00	25.22	175.98	7.166	14.33
3	1804337529120201023-ETP 01-3	22.1	55.1	4.59	2.02	250.00	26.96	212.21	6.353	12.71
4	1804337529120201023-ETP 01-4	22.2	55.1	6.62	2.06	275.00	20.17	142.61	7.070	14.14
5	1804337529120201023-ETP 01-5	22.1	55.1	4.68	2.15	300.00	29.82	186.39	7.998	16.00
				Promedio		275.000	26.584	188.878	7.071	14.142
				Desviación Estándar		28.868	11.122	80.957	0.705	1.409
				Coeficiente de variación		10.497	41.836	42.862	9.966	9.966

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

**Tabla 3-4.** Resultados de los ensayos a tracción de las probetas de materia base de acrílico.

Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Calculado) (MPa)	Desplazamiento	% Elongación (Calculado)
				Ancho	Espesor					
6	1804337529120201023-ETP 02-1	22.5	49.3	4.64	2.24	250.000	24.05	173.77	6.921	13.84
7	1804337529120201023-ETP 02-2	22.5	49.3	4.62	2.26	300.000	28.73	228.03	6.300	12.60
8	1804337529120201023-ETP 02-3	22.5	49.3	4.72	2.27	250.000	23.33	186.19	6.266	12.53
9	1804337529120201023-ETP 02-4	22.5	49.3	5.02	2.28	300.000	26.21	197.91	6.622	13.24
10	1804337529120201023-ETP 02-5	22.5	49.3	4.41	2.28	350.000	34.81	318.13	5.471	10.94
				Promedio		290.000	27.428	220.805	6.316	12.632
				Desviación Estándar		19.149	2.046	58.348	0.678	1.356
				Coeficiente de variación		6.603	7.460	26.425	10.732	10.732

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En las tablas 2-4 y 3-4 se observan los resultados de los ensayos a tracción de las distintas probetas, la norma para el ensayo 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.

#### 4.1.3.2 *Ensayo de impacto*

Para este ensayo 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 ISO 179-1, 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 y ésta se pueden observar en la figura 9-4.



**Figura 8-4.** Probetas para el ensayo a impacto.

Izquierda: Probeta soldada, derecha: Probeta unida con pegamento.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

A continuación, en la tabla 4-4 se describe el método del ensayo utilizado y la información de la máquina utilizada.

**Tabla 4-4.** Datos del ensayo de impacto.

<b>DATOS DEL ENSAYO</b>	
Método de ensayo: NTE INEN ISO 179-2:2014 Plásticos. Determinación de las propiedades frente al Impacto Charpy. Parte 2: Ensayo de impacto instrumentado.	
<b>Designación del método:</b> ISO 179-1/1eU.	
<b>Tipo de ensayo:</b> Cuantitativo	
<b>Capacidad del péndulo, (J):</b> R5-7,5.	
<b>Horas de acondicionamiento (luego del entalle):</b> No aplica acondicionamiento.	
<b>Equipo utilizado:</b> Máquina ensayo impacto Charpy.	
<b>Modelo:</b> IC-25/IA.	<b>Serie:</b> 1986M002.
<b>Distancia entre yunques:</b> 62 mm.	<b>Muesca de la probeta:</b> Sin Muesca.
Los resultados obtenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en <i>probetas de material acrílico: Polimetilmetacrilato en material base y con unión: con soldadura por fricción y con pegamento</i> . Las probetas fueron recibidas en el Laboratorio de Resistencia de Materiales del CFPMC del H. Gobierno Provincial de Tungurahua.	

<b>OBJETOS DE ENSAYO</b>			
<b>Número de Probetas cuantificadas:</b>			
<b>N°</b>	<b>Identificación de probetas</b>	<b>Polimetilmetacrilato</b>	<b>Probetas a Ensayar</b>
1	1804337529120201023-EIP 01	Material base	3
2	1804337529120201023-EIP 02	Con soldadura por fricción	3
3	1804337529120201023-EIP 03	Unido con pegamento	3
			<b>Total</b>
			<b>9</b>

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

En las siguientes tablas se puede observar los resultados de las pruebas de impacto Charpy.

**Tabla 5-4.** Resultados de los ensayos en las probetas de material base de acrílico.

N°	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm.		Energía de ruptura (J)	Resistencia al impacto,	Resistencia al impacto,
				Ancho	Espesor			
1	1804337529120201023-EIP 01-1	25,1	46,2	11,75	4,22	0,815	69,362	16,436
2	1804337529120201023-EIP 01-2	25,1	46,2	11,53	4,29	0,830	71,986	16,780
3	1804337529120201023-EIP 01-3	25,1	46,2	11,55	4,17	0,786	68,052	16,319
Promedio $\bar{X}$						0,810	69,800	16,512
Desviación estándar $S_{n-1}$						0,022	2,003	0,239
Coeficiente de variación $CV$						2,760	2,870	1,450

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.



**Tabla 6-4.** Resultados de los ensayos en las probetas de acrílico unidas por fricción lineal.

N°	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm.		Energía de ruptura (J)	Resistencia al impacto,	Resistencia al impacto,
				Ancho	Espesor			
4	1804337529120201023-EIP 02-1	25,7	42,4	11,79	3,85	0,091	7,718	2,005
5	1804337529120201023-EIP 02-2	25,7	42,4	11,64	3,68	0,102	8,763	2,381
6	1804337529120201023-EIP 02-3	25,7	42,4	11,57	3,77	0,102	8,816	2,338
Promedio $\bar{X}$						0,098	8,432	2,241
Desviación estándar $S_{n-1}$						0,006	0,619	0,206
Coeficiente de variación $CV$						6,458	7,340	9,195

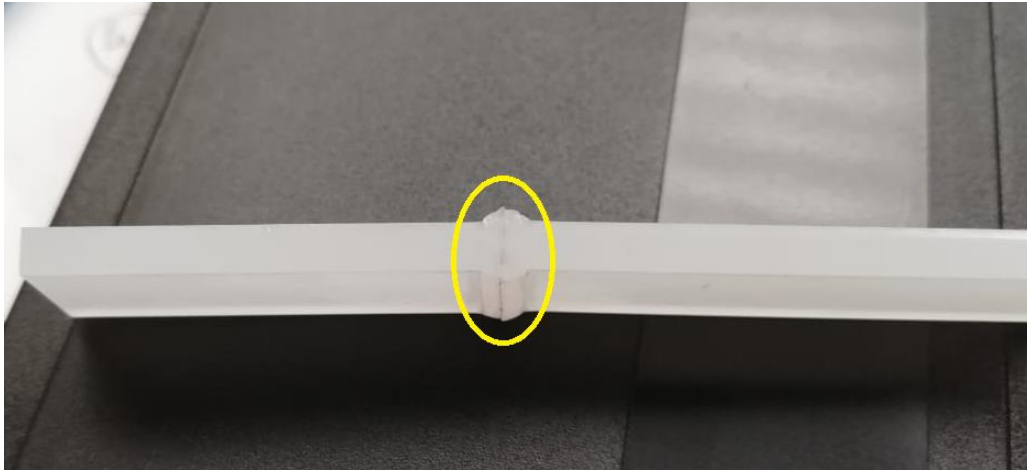
**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

**Tabla 7-4.** Resultados de los ensayos en las probetas unidas mediante pegamento.

N°	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm.		Energía de ruptura (J)	Resistencia al impacto,	Resistencia al impacto,
				Ancho	Espesor			
7	1804337529120201023-EIP 03-1	25,8	42,9	12,03	4,03	0,090	7,481	1,856
8	1804337529120201023-EIP 03-2	25,8	42,9	11,83	4,08	0,078	6,593	1,616
9	1804337529120201023-EIP 03-3	25,8	42,9	11,66	4,06	0,067	5,746	1,415
Promedio $\bar{X}$						0,078	6,607	1,629
Desviación estándar $S_{n-1}$						0,012	0,868	0,221
Coeficiente de variación $CV$						14,685	13,132	13,555

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Se evidencia que las probetas de materia 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.



**Figura 10-4.** Probeta de impacto donde se observa la zona de soldadura.

**Fuente:** Autor

La probeta unida por soldadura por fricción tiene el 12% de la resistencia al impacto que las probetas con material base, este puede deberse a que en la zona de soldadura quedan pequeñas fisuras debido al enfriamiento del material reblandecido que sale expulsado en los primeros segundos de la soldadura como se ve en la figura 10-4.

#### **4.2 Comprobación de la hipótesis**

La hipótesis planteada al inicio de la presente investigación es la siguiente: “El diseño y la construcción de la máquina de soldadura por fricción lineal si permitirá unir materiales hechos en acrílico”.

La comprobación de la hipótesis se realizó mediante las pruebas de soldadura realizadas con la máquina concebida (variable independiente), dónde se verificó que si se pueden obtener soldaduras por fricción lineal de placas de acrílico (variable dependiente), mediante la aplicación de parámetros adecuados para realizarlos (variable interviniente). Los resultados de estas pruebas se pueden ver en la tabla 1-4, donde se puede observar que las soldaduras que se pueden realizar mediante esta máquina con los siguientes parámetros: 100Hz de frecuencia, 4mm de amplitud, presión de contacto 1,16 MPa (mínimo) y tiempos de soldadura de 8 segundos como mínimo.

### 4.3 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 de presión de contacto debe ser superior a 1,10 MPa aproximadamente y que el tiempo de soldadura debe ser igual o superior a 8 segundos, mientras que los parámetros de frecuencia y su amplitud son constantes, valores menores a los indicados no garantizan el éxito en la soldadura como se puede observar en la tabla 1-4.

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.

## CAPÍTULO V

### 5 PROPUESTA

#### 5.1 Introducción

El tipo de soldadura que se obtiene con el prototipo de máquina principalmente se la concibió para poder hacerla en posición perpendicular y poder realizar la unión de piezas de acrílico con aplicaciones decorativas como los llamados Habladores de acrílico (figura 1-5).



**Figura 1-5.** Aplicaciones del acrílico

Fuente:

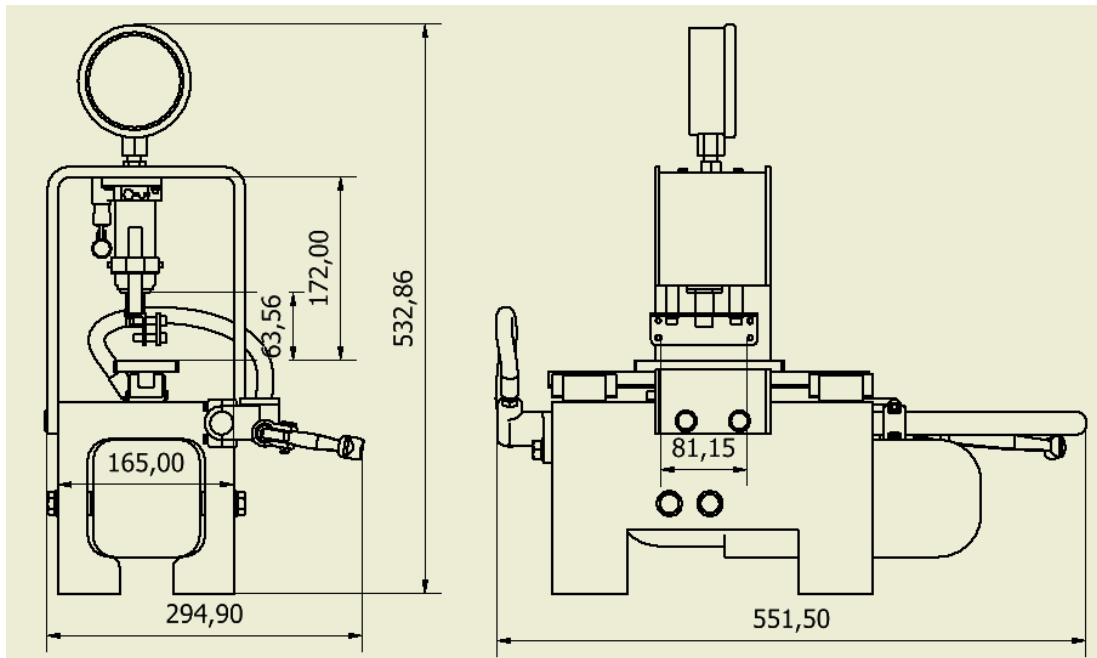
[https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.fabriacril.com%2Fproductos%2Fproductos-en-acrilico%2F&psig=AOvVaw2Y4WEkjd5B1v7n\\_bpnx5DC&ust=1606966619534000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCMDiiqmvrU0CFQAAAAAdAAAAABAE](https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.fabriacril.com%2Fproductos%2Fproductos-en-acrilico%2F&psig=AOvVaw2Y4WEkjd5B1v7n_bpnx5DC&ust=1606966619534000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCMDiiqmvrU0CFQAAAAAdAAAAABAE)

En esta parte de la investigación se muestra un análisis de los procesos, dimensiones, y costos de fabricación de la máquina de soldadura por fricción lineal de acrílico. Además, se comparan los costos de las máquinas que existen en el mercado internacional con el prototipo de la máquina construida.

#### 5.2 Dimensiones

En el siguiente gráfico (figura 2-5), se pueden observar, las dimensiones de la máquina que deben ser consideradas para para ubicación o instalación de la máquina. Éste prototipo puede montarse sobre cualquier superficie horizontal como en una mesa de trabajo y ser empennada para evitar el desplazamiento la misma. Además, se pueden observar las medidas del área de soldadura el cual indica el tamaño máximo de las piezas que se pueden instalar para realizar las soldaduras, éstas

medidas pueden variar de acuerdo a la configuración de las mordazas según la geometría de la piezas a unir, para las pruebas que se realizaron en la presente investigación se usaron las mordazas establecidas en los planos, con las cuales se pudo trabajar en un volumen de trabajo de (63,46 x 165,00 x 81,15) mm, debido a la configuración de las mordazas y la posición de la gata hidráulica. Las mordazas y la posición de la gata se pueden modificar según el propósito y si se lo hace se puede tener un volumen de trabajo de (172,00 x 165,00 x Largo de la máquina) mm.



**Figura 2-5.** Dimensiones en milímetros de la máquina *construida*.

**Realizado por:** Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

### 5.3 Proceso de manufactura

En la siguiente tabla se indican los procesos de construcción que se utilizaron para la obtención del prototipo de máquina de soldadura por fricción lineal de acrílico que servirá como guía para una posible reproducción de la misma.

**Tabla 1-5.** Procesos de manufactura de la máquina de soldadura por fricción lineal de acrílico.

Pieza	Proceso de manufactura	Máquina	Descripción
Estructura y mordazas	Corte	Máquina de corte de disco	Se cortó la geometría de la pieza modelada
	Soldadura	Máquina de soldadura SMAW	Se soldaron las piezas cortadas con electrodo 6011.

	Fresado	Fresadora	Se taladro los agujeros de la plataforma para sujeción de pernos
Soporte prensa hidráulica	Corte	Máquina de corte de disco	Se cortó la plancha de acero según las medidas de los planos.
	Doblado	Máquina dobladora de planchas.	Se dobló la plancha cortada y se obtuvo la pieza modelada.
Acople excéntrico, bocines y pasador de la biela.	Maquinado	Torno	Mediante el torno se maquinaron las piezas según el detalle de los planos.
Biela	Maquinado	Máquina CNC	Se realizaron los cortes desde un bloque de hierro fundido con las medidas especificadas en los planos.
Horquilla de freno	Maquinado	Torno	Se maquinó una barra de acero con las medidas especificadas en los planos para obtener el eje de la horquilla.
	Doblado	Máquina de doblado	Mediante el doblado de una placa de acero se llegó a la forma requerida.
	Soldadura	Máquina de soldadura SMAW	Se unió la horquilla con su eje mediante soldadura SMAW con electrodo 6011.
Pintura	Pintado por aerosol.	Compresor de aire y pistola de pintura.	Se aplicó pintura anticorrosiva sobre la estructura y elementos sin pintura predeterminada.

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

#### 5.4 Costos de construcción

Para obtener el prototipo de máquina de soldadura por fricción lineal se tuvieron los siguientes gastos (Tabla 2-5).

**Tabla 2-5.** Tabla de costos en el proceso de construcción.

Cantidad	Descripción	Valor unitario (dólares)	Valor total (dólares)
<b>COSTOS DIRECTOS</b>			
1	Amoladora DEWALT	250	250
1	Conjunto riel deslizador	120	120
1	Manilla-Bomba de freno	30	30
1	Manguera hidráulica de freno	15	15
1	Cilindro esclavo de embrague	40	40
1	Mesa estructural	60	60
1	Soporte de prensa	40	40
1	Gata hidráulica de 3 Ton	20	20
1	Biela	40	40
1	Acople excéntrico	10	10
1	Pasador de la biela	10	10

2	Juego de mordazas	12	24
1	Guía de mordaza	20	20
1	Horquilla de freno	15	15
1	Zapata para freno	5	5
1	Cable de alimentación	10	10
1	Contacto eléctrico normalmente cerrado.	3	3
4	Correas plásticas	2	8
2	Rodamientos	8	16
1	Manómetro con glicerina de presión hasta 3 Bar.	12	12
20	Tuercas y pernos	0.20	4
		<b>TOTAL</b>	<b>752</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>			
-	Mano de Obra	400	400
		<b>Total</b>	<b>400</b>
<b>IMPREVISTO</b>			
-	Ensayos de laboratorio	250	250
		<b>Total</b>	<b>250</b>
<b>COSTO TOTAL</b>			
<b>C. DIRECTOS + C. INDIRECTOS + IMPREVISTOS</b>			<b>1402</b>

Realizado por: Toasa Jimenes, Rodrigo Patricio, 2021.

Claramente se puede observar que la fabricación de ésta máquina es mucho más económica que adquirir una máquina desde el exterior que tiene precios superiores a los \$ 40.000, cómo se observó en el capítulo 2 del presente trabajo, esto beneficiará a los pequeños negocios del país que requieran soldar acrílico con propósitos decorativos.

## 5.5 Aplicación

Cómo se mencionó anteriormente existen diversas aplicaciones para la soldadura por fricción en distintas áreas de la industria, a continuación, se muestra cómo aplicar éste tipo de soldadura en la industria de la publicidad.





**Figura 3-5.** Habladores de acrílico usados en la publicidad. Izquierda: Frontal del hablador. Derecha: Vista posterior del hablador.

**Fuente:** Autor

En la industria nacional de la publicidad en el Ecuador se fabrican habladores como se observa en a figura 2-5, éstos habladores tienen como soporte un pequeño perno para que el hablador esté en la posición que se desea, pero, éste tipo de soporte no es estable, por lo que se debe buscar otra opción de soporte.

En la figura 3-5, se indica un hablador con un soporte de acrílico unido mediante la soldadura por fricción lineal, teniendo así un mejor soporte que garantice la unión entre las placas con una resistencia mecánica a la tracción similar al acrílico mismo.



**Figura 4-5.** Aplicación de la soldadura por fricción lineal en un hablador de acrílico.

Fuente: Autor

## 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. Éstas propiedades fueron necesarias para poder realizar las simulaciones mediante software CAE y poder determinar las 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 por 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 a 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.

## **RECOMENDACIONES**

- Implementar un sistema de control de posición, para realizar soldaduras con posiciones más precisas.
- Cambiar las herramientas de sujeción para modificar el volumen de trabajo o para la soldadura de elementos de distintas geometrías a las mostradas en la presente investigación.
- Implementar sistemas de control automático para automatizar el proceso de soldadura o para reducir los tiempos de soldadura.
- Para realizar una evaluación de la resistencia mecánica más completa y precisa se recomienda realizar ensayos de resistencia a flexión y a esfuerzo cortante además de los ensayos aplicados en la presente investigación, con equipos adecuados para termoplásticos.
- Realizar ensayos no destructivos con líquidos penetrantes para determinar la existencia de fisuras o grietas formadas durante el proceso de la soldadura.

## BIBLIOGRAFÍA

- BROWN, R. (2002). *Handbook of Polymer Testing* (Rapra Technology Limited).
- Charrault, E., Gauthier, C., Marie, P., & Schirrer, R. (2008). Structural recovery (physical ageing) of the friction coefficient of polymers. *Journal of Polymer Science*, 11.
- Crawford, R. J., & Tam, Y. (1981). Friction welding of plastics. *Journal of Materials Science*, 16(12), 3275-3282. <https://doi.org/10.1007/BF00586287>
- Grewell, D., & Benatar, A. (2007). *Welding of Plastics: Fundamentals and New Developments*. *Polymer Processing Society*, 18.
- HIWIN. (s. f.). *INFORMACIÓN TÉCNICA «GUÍAS LINEALES»*. [www.gaessa.com](http://www.gaessa.com)
- Li, W.-Y., Ma, T., & Li, J. (2010). Numerical simulation of linear friction welding of titanium alloy: Effects of processing parameters. *Materials and Design*, 11.
- López, L. R. (2013). Soldadura por fricción. *Universidad del Bío-Bío*.
- Mabie, H., & Ocvirk, F. (1978). *Mecanismos y Dinámica de Maquinaria*. Limusa.
- Neumann, J. A., & Bockhoff, F. J. (2013). *Welding of Plastics*. Literary Licensing, LLC.
- Nicholas, E. D. (1976). Friction Welding Plastics. *Welding Institute Res. Bull.*
- Paucar, P., & Suquillo, A. (2018). SOLDABILIDAD Y ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN (FRW) Y LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW) EN LOS POLÍMEROS POLIAMIDA PA-66 Y POLIETILENO. *ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL*, 108.
- Shigley, J. E. (2001). *Teoría de máquinas y mecanismos*. McGraw Hill.
- Stokes, V. K. (1988a). Vibration welding of thermoplastics. Part II: Analysis of the welding process. *Polymer Engineering & Science*, 28(11), 728-739. <https://doi.org/10.1002/pen.760281105>
- Stokes, Vijay. K. (1988b). Vibration welding of thermoplastics. Part I: Phenomenology of the welding process. *Polymer Engineering & Science*, 28(11), 718-727. <https://doi.org/10.1002/pen.760281104>

- Troughton, M. J. (Ed.). (2008). *Handbook of plastics joining: A practical guide* (2nd ed).  
William Andrew ; TWI/The Welding Institute.
- Ullman, D. G. (2004). *The Mechanical Design Process*. McGraw Hill.
- Vairis, A., & Frost, M. (1998). High frequency linear friction welding of a titanium alloy. *Wear*,  
217(1), 117-131. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00145-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00145-8)
- Wanjara, P., & Jahazi, M. (2005). Linear friction welding of Ti-6Al-4V: Processing,  
microstructure, and mechanical-property inter-relationships. *Metallurgical and  
Materials Transactions A*, 36(8), 2149-2164. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0335-5>
- Wenya, L., & Feifan, W. (2011). Modeling of continuous drive friction welding of mild steel.  
*Materials Science and Engineering: A*, 528(18), 5921-5926.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.001>
- Wenya, L., Wang, F., Shanxiang, S., & Tiejun, M. (2014). Numerical Simulation of Linear  
Friction Welding Based on ABAQUS Environment: Challenges and Perspectives.  
*Journal of Materials Engineering and Performance*, 23. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0776-8>



patricio toasa &lt;rodrigopatricio89@gmail.com&gt;

---

**Translation July 15**

1 mensaje

---

**MARJORY ESTEFANIA LECHON DE LA CRUZ** <marjory.lechon@epoch.edu.ec> 15 de julio de 2021, 17:37

Para: "rodrigopatricio89@gmail.com" &lt;rodrigopatricio89@gmail.com&gt;, Centro de Idiomas &lt;idiomas@epoch.edu.ec&gt;

Dear Mr.Rodrigo Patricio Toasa

The purpose of this email is to inform you that the respective translation of your abstract from;

Maestría en Diseño Mecánico Cohorte II

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

It has been carried out satisfactorily. If you have any queries, please answer the email.

Regards

Marjory E.Lechon

EFL Professor

Get [Outlook for iOS](#)

---

 **Patricio Toasa 15 Julio.pdf**  
9K



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE  
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL**

**REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

**Fecha de entrega:** 29 / 07 / 2021

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> <i>Rodrigo Patricio Toasa Jimenes</i>
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<i>Instituto de Posgrado y Educación Continua</i>
<b>Título a optar:</b> <i>Magíster en Diseño Mecánico</i>
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> <i>Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.</i>

**LUIS  
ALBERTO  
CAMINOS  
VARGAS**

Firmado digitalmente por  
LUIS ALBERTO CAMINOS  
VARGAS  
Nombre de reconocimiento  
(DN): c=EC, l=RIOBAMBA,  
serialNumber=0602766974,  
cn=LUIS ALBERTO CAMINOS  
VARGAS  
Fecha: 2021.07.29 14:37:56  
-05'00'



0083-DBRAI-UPT-IPEC-2021