



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MECÁNICA**

**“INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO DE  
SOLDADURA FRICCIÓN AGITACIÓN (FSW) EN LA  
MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE  
PLACAS DE ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061 Y 1100”**

**Trabajo de Titulación**

Tipo: Trabajo Experimental

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTORAS:**

PAOLA DANIELA REA CHELA

KAREN STEPHANIE VÁSCONEZ MAYORGA

**DIRECTOR:** Ing. GEOVANNY GUILLERMO NOVILLO ANDRADE

Riobamba-Ecuador

2020

**©2020, Paola Daniela Rea Chela; y Karen Stephanie Vásquez Mayorga**

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.

Nosotras, Karen Stephanie Vásconez Mayorga y Paola Daniela Rea Chela, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

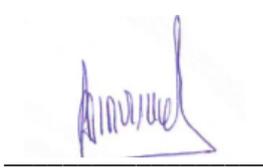
Riobamba, 30 de enero de 2020

Karen Stephanie Vásconez Mayorga  
060408027-5

Paola Daniela Rea Chela  
02020157334-2

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MECÁNICA**

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: TRABAJO EXPERIMENTAL, **INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO DE SOLDADURA FRICCIÓN AGITACIÓN (FSW) EN LA MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE PLACAS DE ALEACION DE ALUMINIO 6061 Y 1100**, realizado por las señoritas: **KAREN STEPHANIE VÁSCONEZ MAYORGA** y **PAOLA DANIELA REA CHELA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		<b>2020-01-30</b>
Ing. Geovanny Guillermo Novillo Andrade <b>TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		<b>2020-01-30</b>
Dr. Marco Vinicio Guevara Granizo <b>MIEMBRO DE TRIBUNAL</b>		<b>2020-01-30</b>

## **DEDICATORIA**

Este trabajo es dedicado para mis hermanos Fabián y Emilie, que a pesar de las dificultades que nos pongan con un poco de esfuerzo y dedicación, los sueños se alcanzan, y no dejen de trabajar por los suyos, son palabras de su hermana que los ama.

Karen Stephanie Vásconez Mayorga

A toda mi familia, mi madre Anita, mi padre Modesto, mis hermanos Maribel, Paul y a mi pequeña sobrina Isabellita que de diferentes formas cada uno iba contribuyendo en mi formación y fueron el pilar fundamental durante el mismo.

Paola Daniela Rea Chela

## **AGRADECIMIENTO**

Tengo la bendición de tener a mis abuelitos: Evita, Aurori, Rafa y Milti a mi lado, por lo que le agradezco a Dios por esto, y a ellos les debo todo el apoyo y el amor que siempre me han dado, más que abuelos han sido padres y madres, también les agradezco a mis padres Fabian y Aleja, que han sido quienes me han ayudado a levantarme de toda caída, con sus palabras de aliento y a veces a regañadientes he continuado hasta llegar aquí, a mi novio Henry por ser la persona que siempre me escucha y entiende mis problemas, se alegra de mis logros y comparte mi dolor en los malos momentos.

Karen Stephanie Vásquez Mayorga

Agradezco a Dios y a la Virgen, por permitirme culminar exitosamente esta importante etapa de mi formación educativa. A toda mi familia, en especial a mis abuelitos Francisco, Rosario, Josefina, Segundo que siempre con su bendición y oraciones me llenaban de valentía y desaparecían todos mis miedos. Agradezco también a todos esos amigos en especial a: Vanesa, Erika, Karen, Juleysi, Jonatan, Juan, Pichi, Henry, Dario, Pedrito con los que compartí malas noches, miedos, nervios pero que, con sus locuras y ocurrencias ocasionales, me permitieron disfrutar de toda la vida estudiantil.

Paola Daniela Rea Chela

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXO.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN .....	1

## CAPITULO I

<b>1</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1</b>	<b>Aluminio.....</b>	<b>4</b>
<i>1.1.1</i>	<i>Propiedades del aluminio .....</i>	<i>4</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Uso y aplicación del aluminio .....</i>	<i>5</i>
<i>1.1.2.1</i>	<i>Ligereza.....</i>	<i>5</i>
<i>1.1.2.2</i>	<i>Resistencia a la corrosión .....</i>	<i>5</i>
<i>1.1.2.3</i>	<i>Facilidad de fabricación.....</i>	<i>5</i>
<i>1.1.2.4</i>	<i>Toxicidad.....</i>	<i>6</i>
<i>1.1.2.5</i>	<i>Propiedades magnéticas.....</i>	<i>6</i>
<i>1.1.2.6</i>	<i>Conductividad eléctrica.....</i>	<i>6</i>
<i>1.1.2.7</i>	<i>Uso a baja temperatura.....</i>	<i>6</i>
<i>1.1.2.8</i>	<i>Reflectividad.....</i>	<i>6</i>
<i>1.1.2.9</i>	<i>Reciclabilidad.....</i>	<i>6</i>
<b>1.2</b>	<b>Aleaciones del aluminio.....</b>	<b>6</b>
<i>1.2.1</i>	<i>Tipos de aleaciones de aluminio .....</i>	<i>7</i>
<i>1.2.1.1</i>	<i>Aleaciones forjadas no tratables térmicamente.....</i>	<i>7</i>
<i>1.2.1.2</i>	<i>Aleaciones forjadas tratables térmicamente.....</i>	<i>7</i>
<i>1.2.1.3</i>	<i>Aleaciones de fundición.....</i>	<i>7</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Sistema de designación para aleaciones de aluminio forjado. ....</i>	<i>7</i>
<i>1.2.3</i>	<i>Efecto de los elementos de aleación en el aluminio .....</i>	<i>9</i>
<i>1.2.3.1</i>	<i>Serie 1xxx: .....</i>	<i>9</i>
<i>1.2.3.2</i>	<i>Serie 2xxx: .....</i>	<i>9</i>
<i>1.2.3.3</i>	<i>Serie 3xxx: .....</i>	<i>10</i>
<i>1.2.3.4</i>	<i>Serie 4xxx: .....</i>	<i>10</i>
<i>1.2.3.5</i>	<i>Serie 5xxx: .....</i>	<i>11</i>

1.2.3.6	<i>Serie 6xxx:</i>	11
1.2.3.7	<i>Serie 7xxx:</i>	12
<b>1.3</b>	<b>Soldadura.</b>	<b>12</b>
1.3.1	<i>Soldadura en estado sólido.</i>	13
<b>1.4</b>	<b>Soldadura por Fricción-Agitación (FSW).</b>	<b>14</b>
1.4.1	<i>Proceso de FSW.</i>	14
1.4.2	<i>Zonas de la soldadura por fricción agitación</i>	16
1.4.2.1	<i>Zona mezclada.</i>	16
1.4.2.2	<i>Zona afectada termomecánicamente (TMAZ)</i>	16
1.4.2.3	<i>Zona afectada por el calor (HAZ)</i>	16
1.4.2.4	<i>Material base</i>	16
1.4.3	<i>Herramienta</i>	16
1.4.3.1	<i>Geometría de la herramienta.</i>	17
1.4.3.2	<i>Material de la herramienta.</i>	19
1.4.4	<i>Tipos de junta.</i>	19
1.4.5	<i>Equipo FSW.</i>	20
1.4.5.1	<i>Equipo para pin fijo.</i>	20
1.4.5.2	<i>Equipo para pin ajustable</i>	21
1.4.5.3	<i>Equipo para pin autoajustable</i>	21
1.4.6	<i>Aplicaciones</i>	22

## CAPITULO II

<b>2</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO</b>	<b>23</b>
2.1	<b>Materiales y equipos</b>	<b>23</b>
2.1.1	<i>Placas de experimentación.</i>	23
2.1.2	<i>Equipo utilizado.</i>	24
2.1.3	<i>Herramienta de soldadura.</i>	24
2.1.3.1	<i>Partes de la herramienta de soldadura</i>	25
2.2	<b>Parámetros de soldadura.</b>	<b>26</b>
2.3	<b>Sistema de sujeción</b>	<b>28</b>
2.4	<b>Procedimiento para soldar aluminio por fricción-agitación.</b>	<b>29</b>
2.5	<b>Inspección visual</b>	<b>31</b>
2.6	<b>Metodología para toma de ensayos.</b>	<b>32</b>
2.6.1	<i>Tracción.</i>	32
2.6.1.1	<i>Equipo.</i>	32

2.6.1.2	<i>Norma</i> .....	33
2.6.1.3	<i>Probetas</i> .....	34
<b>2.6.2</b>	<b><i>Doblado</i></b> .....	<b>34</b>
2.6.2.1	<i>Equipo</i> .....	34
2.6.2.2	<i>Norma</i> .....	35
2.6.2.3	<i>Probetas</i> .....	35
<b>2.6.3</b>	<b><i>Dureza</i></b> .....	<b>36</b>
2.6.3.1	<i>Equipo</i> .....	36
2.6.3.2	<i>Norma</i> .....	36
2.6.3.3	<i>Probetas</i> .....	37
<b>2.7</b>	<b>Metodología para análisis metalográficos</b> .....	<b>37</b>
2.7.1	<i>Macrografía</i> .....	38
2.7.2	<i>Micrografía</i> .....	38

### CAPITULO III

<b>3</b>	<b>ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Parámetros de soldadura</b> .....	<b>39</b>
<b>3.2</b>	<b>Inspección visual</b> .....	<b>39</b>
<b>3.3</b>	<b>Análisis metalográfico</b> .....	<b>39</b>
3.3.1	<i>Macro y micro estructura</i> .....	39
3.3.1.1	<i>Aluminio 1100</i> .....	41
3.3.1.2	<i>Aluminio 6061</i> .....	42
<b>3.4</b>	<b>Propiedades mecánicas</b> .....	<b>42</b>
3.4.1	<i>Dureza</i> .....	43
3.4.2	<i>Ensayo de tracción</i> .....	45
3.4.2.1	<i>Aluminio 1100</i> .....	45
3.4.2.2	<i>Aluminio 6061</i> .....	46
3.4.3	<i>Ensayo de doblado</i> .....	48
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>50</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>52</b>
	<b>GLOSARIO</b>	
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	
	<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1-1:</b> Designación de las aleaciones de aluminio .....	8
<b>Tabla 2-1:</b> Designación de los procesos de soldadura en estado sólido.....	13
<b>Tabla 3-1:</b> Dimensiones recomendadas de herramienta de soldadura .....	18
<b>Tabla 4-1:</b> Juntas a tope .....	19
<b>Tabla 5-1:</b> Juntas traslapadas .....	20
<b>Tabla 6-1:</b> Juntas tipo filete.....	20
<b>Tabla 1-2:</b> Composición química de la aleación de aluminio 1100 en porcentaje de peso.....	23
<b>Tabla 2-2:</b> Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 1100 .....	23
<b>Tabla 3-2:</b> Composición química de la aleación de aluminio 6061 en porcentaje de peso.....	23
<b>Tabla 4-2:</b> Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6061 .....	23
<b>Tabla 5-2:</b> Parámetros de velocidades recomendados .....	26
<b>Tabla 6-2:</b> Juntas soldadas de aluminio 1100 de 3mm de espesor.....	26
<b>Tabla 7-2:</b> Juntas soldadas de aluminio 6061 de 3mm de espesor.....	27
<b>Tabla 1-3:</b> Parámetros Finales.....	39
<b>Tabla 2-3:</b> Resultados de pruebas de doblado.....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1-1.</b> Ejemplo de las aplicaciones de la serie 1xxx. ....	9
<b>Figura 2-1.</b> Serie 2xxx utilizada en el campo del transporte, aviación y aeronáutica .....	9
<b>Figura 3-1.</b> Serie 3xxx usada en intercambiadores de calor, latas de aluminio, y techos. ....	10
<b>Figura 4-1.</b> Serie 4xxx utilizada para alambres de soldadura y en la arquitectura .....	10
<b>Figura 5-1.</b> Serie 5xxx usada para automóviles, barcos y en tanques de almacenamiento. ....	11
<b>Figura 6-1.</b> Aplicaciones arquitectónicas, estructurales y en la industria automotriz .....	11
<b>Figura 7-1.</b> Serie 7xxx utilizada ampliamente en la aeronáutica. ....	12
<b>Figura 8-1.</b> Serie 7xxx utilizada ampliamente en la aeronáutica .....	14
<b>Figura 9-1.</b> Proceso FSW .....	15
<b>Figura 10-1.</b> Zonas producidas en una soldadura por fricción. ....	16
<b>Figura 11-1.</b> Herramienta de soldadura por fricción agitación. ....	17
<b>Figura 12-1.</b> Tipos de Geometrías de una herramienta de FSW .....	18
<b>Figura 13-1.</b> Equipo para pin fijo .....	21
<b>Figura 14-1.</b> Equipo para pin ajustable .....	21
<b>Figura 15-1.</b> Equipo para pin autoajutable .....	22
<b>Figura 16-1.</b> Aplicaciones del FSW .....	22
<b>Figura 1-2.</b> Fresa CNC .....	24
<b>Figura 2-2.</b> Representación geométrica de la herramienta de soldadura .....	24
<b>Figura 3-2.</b> Partes de la herramienta. ....	25
<b>Figura 4-2.</b> Dimensiones de la herramienta (mm) .....	25
<b>Figura 5-2.</b> Sistema de sujeción .....	28
<b>Figura 6-2.</b> Placas a soldar .....	29
<b>Figura 7-2.</b> Herramienta de soldadura .....	29
<b>Figura 8-2.</b> Instrumentos para fijación .....	30
<b>Figura 9-2.</b> Línea de código usada en el programa CIMCO .....	30
<b>Figura 10-2.</b> Calibración de herramienta de soldadura .....	30
<b>Figura 11-2.</b> Inicio de soldado .....	31
<b>Figura 12-2.</b> Bridge cam .....	31
<b>Figura 13-2.</b> Magnificador .....	32
<b>Figura 14-2.</b> Máquina Universal .....	32
<b>Figura 15-2.</b> Obtención de los especímenes para tracción .....	33
<b>Figura 16-2.</b> Especimen de ensayos de tracción. ....	33
<b>Figura 17-2.</b> Especimen de ensayos a tracción con medidas en mm .....	34

<b>Figura 18-2.</b> Probetas cortadas para tracción de material a)1100 b)6061 .....	34
<b>Figura 19-2.</b> Apoyos para ensayos de doblado .....	35
<b>Figura 20-2.</b> Espécimen de ensayos de doblado .....	35
<b>Figura 21-2.</b> Probetas cortadas para doblado de material a)1100 b)6061 .....	36
<b>Figura 22-2.</b> Equipo de microdureza Vickers .....	36
<b>Figura 23-2.</b> Probetas para ensayos de Microdureza .....	37
<b>Figura 24-2.</b> Microscopio óptico.....	37
<b>Figura 1-3.</b> Macrografía de la probeta de aleación de aluminio 1100.....	41
<b>Figura 2-3.</b> Microestructura de la junta soldada por FSW de una aleación de aluminio 1100:a)NZ; b)Sección límite entre NZ a TMAZ; c)HAZ; d)Metal base de la aleación. ....	41
<b>Figura 3-3.</b> Macrografía de la probeta de aleación de aluminio 6061.....	42
<b>Figura 4-3.</b> Microestructura de la junta soldada por FSW de una aleación de aluminio 6061 a)NZ; b)Sección límite entre NZ a TMAZ; c)HAZ; d)Metal base de la aleación. ....	42
<b>Figura 5-3.</b> Probetas ensayadas de aleación de aluminio 1100.....	45
<b>Figura 6-3.</b> Probetas ensayadas de aleación de aluminio 6061 .....	47

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

	<b>Pág.</b>
<b>Gráfico 1-1:</b> Curva esfuerzo-deformación del aluminio. ....	5
<b>Gráfico 1-3:</b> Durezas obtenidas del material 1100.....	44
<b>Gráfico 2-3:</b> Durezas obtenidas del material 6061.....	44
<b>Gráfico 3-3:</b> Curvas Tensión-Deformación para las probetas de aluminio 1100.....	46
<b>Gráfico 4-3:</b> Curvas Tensión-Deformación para las probetas de aluminio 6061.....	48

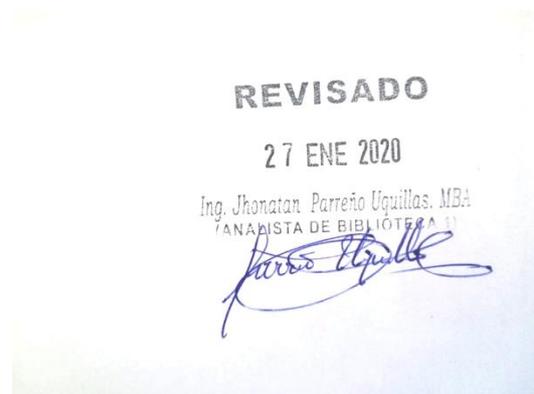
## **ÍNDICE DE ANEXOS**

- ANEXO A:** ESTRUCTURA DE LAS WPS DE LAS PLACAS SOLDADAS POR FRICCIÓN AGITACIÓN.
- ANEXO B:** INFORME DE ENSAYOS DE TRACCIÓN.
- ANEXO C:** INFORME DE ENSAYOS DE DOBLADO
- ANEXO D:** PLANOS SISTEMA DE FIJACIÓN
- ANEXO E:** PLANOS HERRAMIENTA DE SOLDADURA

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es analizar tanto las propiedades mecánicas como las microestructuras de las placas de aleación de aluminio 6061 y 1100 soldadas por el método fricción agitación (FSW). Se realizaron varios experimentos hasta encontrar los parámetros con los que se obtuvo un buen cordón de soldadura. El proceso de soldadura FSW se llevó a cabo utilizando una fresa CNC a la que se le adaptó una herramienta de geometría cilíndrica para conseguir la soldadura de placas de aluminio de 3mm de espesor con una junta tipo tope y penetración completa. Se utilizó un sistema de sujeción para evitar el desplazamiento transversal y longitudinal de las placas. Los parámetros variados fueron: velocidad de rotación, velocidad de avance y se analizó visualmente las muestras para luego realizar ensayos de: tracción, dureza, doblado y un análisis macro y micro estructural. Se determinó que las propiedades mecánicas como dureza y resistencia a la tracción máximas obtenidas fueron mayores a las del metal base, en el caso de los dos tipos de aluminio en las juntas soldadas, producto de un refinamiento de grano y transformación de precipitados gruesos en finos que se produce durante este proceso. Con el presente trabajo se concluye que usando el proceso FSW se obtienen soldaduras libres de discontinuidades, siempre y cuando se encuentre una buena combinación de parámetros. Se recomienda en el estudio de FSW controlar la variable de temperatura utilizando un instrumento adecuado con la finalidad de que todo el cordón de soldadura obtenga las mismas propiedades mecánicas.

**Palabras clave:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <MECÁNICA>, <MÉTODO FRICCIÓN AGITACIÓN (FSW)>, <SOLDADURA DE ALUMINIO>, <FRESA DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO (CNC)>, <ENSAYOS MECÁNICOS>, <MICROESTRUCTURA>.



## ABSTRACT

The aim of this research is to analyse both, the mechanical properties and the microstructures of aluminium alloy 6061 and 1100 plaques welded by the Friction-Stirring method FSW (Friction Stir Welding). Several experiments were carried out until we found the parameters that gave us a good bead of Weld. The FSW welding process was carried out using a CNC (Computerised Numerical Control) milling machine which a cylindrical geometry tool was adapted to achieve the welding of 3 mm thick aluminium plaques with a top type joint and full penetration. A clamping system was used to prevent transverse and longitudinal displacement of the plaques. The different parameters were: rotation speed and advance speed, and the samples were visually analyzed and then tested for: traction, hardness, bending and a macro and microstructural analysis. It was determined that the mechanical properties such as maximum hardness and tensile strength obtained were greater than those of the base metal, in the case of the two types of aluminium in the welded joints, the product of a grain refinement and transformation of course into fine precipitates that occurs during this process. The present research concludes that using the FSW process, welds are obtained free of discontinuities, as long as a good combination of parameters is found. It is recommended in the FSW study to control the temperature variable using a suitable instrument so that the entire Weld bead obtains the same mechanicals properties.

**Keywords:** <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>, <MECHANICS>, <FRICTION STIR WELDING (FSW)>, <ALUMINUM WELDING>, <COMPUTERIZED NUMBER CONTROL MILLING MACHINE (CNC)>, <MECHANICAL TESTS>, <MICROESTRUCTURE>.



# INTRODUCCIÓN

## Antecedentes

La soldadura por fricción y agitación (FSW) es una técnica de unión de estado sólido, inventada por primera vez The Welding Institute (TWI) en Cambridge, Inglaterra y patentado en 1991. Debido al bajo aporte de calor y la ausencia de un proceso de fusión y solidificación, el proceso FSW podía crear soldaduras de alta calidad sin poros y grietas, y por lo tanto era muy adecuado para unir las aleaciones de aluminio aeroespaciales. Actualmente se está aplicando a las industrias aeroespacial, automotriz y de construcción naval y está atrayendo un creciente interés por la investigación, (D'Urso, et al., 2009)

Actualmente el proceso de Soldadura por Fricción Agitación (FSW) no es muy común en nuestro país por lo que se carece de información acerca del mismo, existen pocos trabajos realizados utilizando este proceso que a continuación se mencionan:

Universidad Técnica de Ambato: “Estudio del proceso de soldadura por fricción agitación (fsw) y su incidencia sobre las propiedades mecánicas en uniones de perfiles de aluminio.” En este trabajo realizan el proceso de soldadura con determinados parámetros, las placas soldadas son sometidas a ensayo de tracción, doblado y dureza obteniendo una mejora en la resistencia y ductilidad del cordón de soldadura, pero una baja dureza del mismo, además de concluir que a una mayor velocidad de rotación la temperatura y el flujo de calor aumenta, caso contrario a baja velocidad de rotación la temperatura y el flujo de calor disminuyen significativamente. (Toapanta, 2015)

Universidad San Francisco de Quito: “Soldadura por Fricción-Agitación (FSW) en Aleaciones de Aluminio 7075”. En este trabajo implementan un modelo térmico usando el software ABACUS con el que obtienen ciclos térmicos teóricos que posteriormente los comparan con experimentales, así mismo la simulación les permite tener los parámetros de soldadura con los que realizaran la experimentación para posteriormente determinar las propiedades mecánicas y microestructura de la junta soldada. Se obtuvo una resistencia máxima de tensión en la soldadura del 90% de la resistencia del material base, en cuanto a la microestructura se concluyó que el tamaño de grano disminuye mientras más cercano esta del cordón de soldadura. (Pérez, 2018)

Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca: “Análisis de la influencia de los parámetros de proceso en la sanidad interna y externa de juntas de aluminio 6061-T6 soldadas mediante el proceso Fricción-Agitación (FSW)”. En este trabajo se estudia los parámetros: geometría de la

herramienta, velocidad de rotación y velocidad de avance para analizar discontinuidades superficiales y volumétricas de 18 placas de aluminio, donde se obtiene que en las juntas soldadas con velocidad de giro de 1615 rpm y velocidad de avance de 101 mm/min es donde se encuentra menor número de discontinuidades. (Mendieta & Montero, 2019)

## **Planteamiento del problema**

Soldar aluminio plantea algunos retos únicos, en especial debido al su punto de fusión bajo y su alta conductividad térmica. El aluminio es especialmente propenso a perforación por quemadura en secciones delgadas, y puede experimentar falta de fusión en secciones gruesas. Discontinuidades de soldadura como fracturas, hollín de la soldadura y porosidad también son grandes problemas, por estas y muchas más razones para soldar aleaciones de aluminio se debe buscar un método apropiado y seguir rigurosamente un procedimiento adecuado el cual está dictado por normas de soldadura como AWS D1.2 (American Welding Society, 2013). Cabe indicar que todo lo descrito anteriormente no garantiza tener un cordón de soldadura con propiedades mecánicas óptimas ya que el calor aplicado cambia su microestructura y con esto sus propiedades.

El objetivo del presente trabajo de titulación es, primero determinar los valores óptimos de los parámetros de soldadura para posteriormente analizar la microestructura y propiedades mecánicas del cordón de soldadura en aleaciones de aluminio soldado por el proceso FSW y de esta manera verificar si este método de soldadura da buenos resultados en las probetas usadas para el análisis.

## **Justificación**

### ***Justificación teórica***

Esta investigación se realiza mediante los conocimientos adquiridos en el área de materiales, soldadura y sólidos II, los cuales sirven de guía para profundizar en la aplicación del proceso FSW, los diferentes ensayos para obtener propiedades mecánicas, y el análisis de las microestructuras de las probetas de aluminio aleado usadas.

### ***Justificación metodológica***

La metodología usada para este proyecto fue inductiva, experimental y analítica, ya que de características particulares que se obtienen experimentando cierto número de placas de 3mm de espesor de aleaciones de aluminio 6061 y 1100, y analizando los resultados que relacionan las propiedades mecánicas con sus respectivas metalografías, se desea llegar a una conclusión general que pueda ser usada en otras investigaciones relacionadas con el tema.

### ***Justificación práctica***

Este estudio permite obtener el procedimiento de soldadura, sus parámetros y analizar las propiedades mecánicas y microestructurales de determinadas aleaciones de aluminio soldadas por el proceso FSW con lo que se puede verificar si con este método se obtienen buenos resultados.

### **Objetivos.**

#### ***Objetivo general***

Determinar la influencia de los parámetros del proceso de soldadura fricción agitación (FSW) en la microestructura y propiedades mecánicas de placas de aleación de aluminio 6061 y 1100.

#### ***Objetivos específicos***

- Investigar el estado del arte del proceso de soldadura FSW, para realizar la soldadura de las juntas de aluminio aleado.
- Adaptar la herramienta de soldadura a una máquina-herramienta para soldar por FSW las placas.
- Determinar los parámetros indispensables tales como: la velocidad de rotación, velocidad de avance, geometría de la herramienta, para controlar la formación del cordón de soldadura en placas de aleación de aluminio 6061 y 1100 de espesor de 3mm.
- Obtener la microestructura de las juntas de aluminio soldado para analizar las distintas zonas que se producen por la aplicación del proceso FSW.
- Realizar ensayos de tracción, doblado y dureza aplicando las respectivas normas para obtener las propiedades mecánicas de las juntas de aleaciones de aluminio soldado por el proceso FSW.

# CAPÍTULO I

## 1 MARCO TEÓRICO

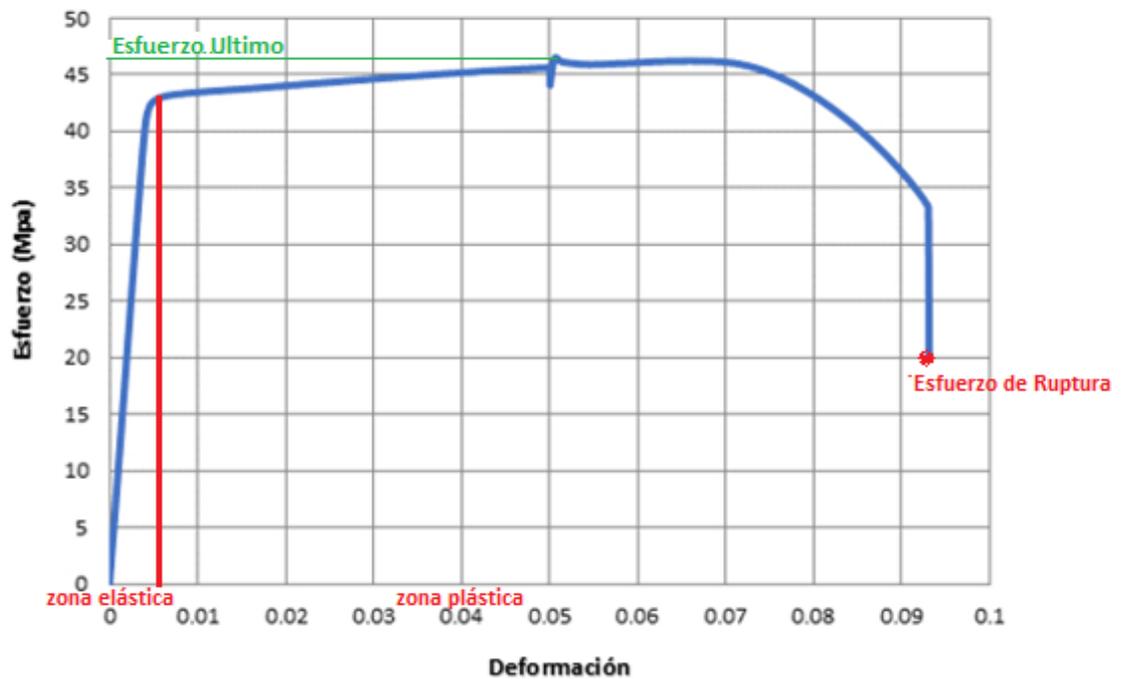
### 1.1 Aluminio.

El aluminio es el tercer elemento metálico más abundante en la corteza terrestre pero no se encuentra en su estado prístino, es más común encontrarlo combinado con el oxígeno. Los lingotes de aluminio pueden ser obtenidos mediante un proceso que consiste en: extraer el mineral de bauxita, refinar la bauxita para obtener alúmina y fundir alúmina para extraer aluminio, (Lumley, 2010). El aluminio puro tiene un aspecto plateado, gris claro y es un metal blando y liviano. Cuando el aluminio está expuesto al aire forma una capa delgada, llamada óxido de aluminio o alúmina, debido a la oxidación que sufre, esta capa protege al metal porque impide la corrosión. El aluminio puro es considerado un metal débil debido a su baja resistencia a la tracción, es por eso que para aplicaciones estructurales o que requieran alta resistencia a la tracción, el aluminio debe alearse con otros elementos químicos pudiendo alcanzar un valor  $500 \text{ N/mm}^2$ , (Ulrich, 2010).

#### *1.1.1 Propiedades del aluminio*

El aluminio es un material ligero con una densidad de  $2.7 \text{ g / cm}^3$  ( $0.1 \text{ lb / pulg.}^3$ ). El aluminio puro y sus aleaciones tienen la cara centrada estructura cúbica (fcc), que es estable hasta su punto de fusión en  $657 \text{ °C}$  ( $1215 \text{ °F}$ ). Debido a que la estructura fcc contiene múltiples planos de deslizamiento permite en gran medida una excelente formabilidad de las aleaciones de aluminio, (ASM International, 2015). El aluminio es un elemento químico cuyo símbolo es Al. En la tabla periódica posee un número atómico 13 y un peso atómico aproximadamente de  $27 \text{ g / mol}$ . El núcleo del átomo de aluminio tiene 13 protones y 14 neutrones, (Ulrich, 2010).

El aluminio dependiendo de sus diferentes variaciones puede tener valores de resistencia a la tracción que varía de 35 a 350 MPa. Su límite elástico puede tener valores mínimos de 22 MPa y alcanzar valores de 300 MPa. Su alargamiento está entre el 5 y 15% y la dureza Brinell puede estar comprendido en rangos de HB=15 para un aluminio puro hasta un HB=110 en el caso de aleaciones. El aluminio posee una excelente propiedad de alargamiento debido a esta característica puede ser sometido a diferentes procesos de manufactura (forjado, laminado etc.). (Galán, 2007)



**Gráfico 1-1:** Curva esfuerzo-deformación del aluminio.

Fuente: (Merdaci, et al., 2019)

## 1.1.2 *Uso y aplicación del aluminio*

### 1.1.2.1 *Ligereza.*

El aluminio posee un peso que es solo un tercio del acero. Esta propiedad lo vuelve importante para las industrias de transporte que construyen aviones, trenes, barcos y automóviles. Esta particularidad es apreciada también en edificios de gran altura y puentes para poder limitar el peso de las grandes estructuras, (Ulrich, 2010).

### 1.1.2.2 *Resistencia a la corrosión*

El aluminio expuesto al aire es capaz de formar su propia capa protectora contra la corrosión. La anodización aumenta aún más la resistencia a la corrosión del aluminio, volviéndola utilizable en la industria del transporte, la industria de la construcción y la fabricación de herramientas y electrodomésticos, (Ulrich, 2010).

### 1.1.2.3 *Facilidad de fabricación*

Debido a su maleabilidad, el aluminio puede fabricarse en varias formas y figuras. Es fácilmente mecanizable y su buena plasticidad permite cortar, doblar, y estirar. El aluminio es considerado como el mejor material para extrusiones de secciones complejas, (Ulrich, 2010).

#### *1.1.2.4 Toxicidad*

El aluminio es inodoro y no es tóxico. Su superficie metálica lisa es fácilmente limpiable lo que permite mantenerla higiénica, debido a estas características se utiliza para producir latas y envases de alimentos, utensilios de cocina y en la industria alimentaria, (Ulrich, 2010).

#### *1.1.2.5 Propiedades magnéticas*

Al tener esta naturaleza no magnética, el aluminio es utilizado en brújulas magnéticas, discos de computadora y antenas, (Ulrich, 2010).

#### *1.1.2.6 Conductividad eléctrica*

El aluminio es usado considerablemente como conductor eléctrico en cables de transmisión de potencia, conductores de subestaciones, y también para bases de bombillas eléctricas, (Ulrich, 2010). Conductividad térmica: este material es tres veces mejor conductor de calor que el acero. Esto lo hace utilizable en equipos de cocina, intercambiadores de calor, aires acondicionados, colectores solares y piezas de motores, (Ulrich, 2010).

#### *1.1.2.7 Uso a baja temperatura*

El aluminio a diferencia del acero aumenta su resistencia a la tracción a bajas temperaturas, no se quebranta y conserva una buena calidad. Por lo tanto, en condiciones ambientales extremas las estructuras de aluminio pueden ser usadas, (Ulrich, 2010).

#### *1.1.2.8 Reflectividad*

Al ser el aluminio altamente reflectante de la luz, las ondas eléctricas y el calor se vuelve usable en espejos, aislamiento, guías de ondas, equipo de iluminación, reflectores de calor (Ulrich, 2010)

#### *1.1.2.9 Reciclabilidad*

Al poseer un bajo punto de fusión, el aluminio puede reciclarse de manera fácil y económica, convirtiéndose en un material moderno, que permite el ahorro de energía y recursos (Ulrich, 2010)

## **1.2 Aleaciones del aluminio.**

Las aleaciones de aluminio son composiciones químicas en las que se ha añadido otros elementos al aluminio puro con el objetivo de mejorar sus propiedades y principalmente para aumentar su

resistencia. Entre los elementos más comúnmente añadidos están: zinc, manganeso, magnesio, cobre, silicio, estos combinados pueden alcanzar hasta el 15% del peso de la aleación, (The Aluminum association, 2010). Las aleaciones de aluminio son usadas de manera amplia en componentes de ingeniería, estructuras donde sea necesario obtener un peso ligero o resistencia a la corrosión, (Persson, 2011).

### ***1.2.1 Tipos de aleaciones de aluminio***

Las aleaciones de aluminio se clasifican normalmente en uno de los siguientes tres grupos:

#### ***1.2.1.1 Aleaciones forjadas no tratables térmicamente.***

Únicamente se endurecen por trabajo en frío mas no por precipitación, estas aleaciones incluyen la serie de aluminio comercialmente puro (1xxx), la serie de aluminio-manganeso (3xxx), la serie de aluminio-silicio (4xxx) y la serie de aluminio-magnesio (5xxx), (ASM International, 2015).

#### ***1.2.1.2 Aleaciones forjadas tratables térmicamente.***

Poseen altos niveles de resistencia, debido a que son endurecidos por precipitación en estas aleaciones están incluidas las series: 2xxx serie (Al-Cu y Al-Cu-Mg), la serie 6xxx (Al-Mg-Si), la 7xxx serie (Al-Zn-Mg), (ASM International, 2015), y la serie 8xxx que puede poseer otros elementos aleantes inusuales entre los más comunes el aluminio-litio.

#### ***1.2.1.3 Aleaciones de fundición.***

Incluyen aleaciones no tratables térmicamente y tratables térmicamente. Las categorías principales incluyen la serie 2xx.x (Al-Cu), la serie 3xx.x (Al-Si + Cu o Mg), la serie 4xx.x (Al-Si), la 5xx.x series (Al-Mg), la serie 7xx.x (Al-Zn) y la serie 8xx.x (Al-Sn), (ASM International, 2015).

### ***1.2.2 Sistema de designación para aleaciones de aluminio forjado.***

El sistema de designación para estas aleaciones consta de cuatro dígitos numéricos, en ocasiones con sufijos alfabéticos.

- El primer dígito define el tipo de aleación principal y mayoritaria, (Kutz, 2015). Entre ellas:

**1000:** Aluminio puro, sin grandes adiciones de otros elementos.

**2000:** Cobre

**3000:** Manganeso

**4000:** Silicio

**5000:** Magnesio

**6000:** Magnesio y Silicio

**7000:** Zinc

**8000:** Otros elementos inusuales (hierro, estaño, litio)

- El segundo dígito indica variaciones en la aleación básica original o límites de impurezas; ese dígito es siempre un 0 para la composición original, un 1 para la primera variación, así sucesivamente, (Kutz, 2015).
- Los dígitos tercero y cuarto indican el porcentaje de los elementos aleantes o la pureza de aluminio, (Kutz, 2015).
- El sufijo que se presenta después de la designación de aleación corresponde a la condición metalúrgica de la aleación de aluminio pudiendo ser: (Kutz, 2015).

**F:** De fabricación

**O:** Recocido

**H:** Endurecido por deformación

**W:** Solución tratada térmicamente

**T:** Tratado térmicamente

Como se muestra en la tabla 1-1 para la designación de aleaciones de aluminio.

**Tabla 1-1:** Designación de las aleaciones de aluminio

<b>6061 F</b>	
6	Magnesio y Silicio
0	Modificaciones
6	Mg+Si= 61%
1	
F	De Fabricación

**Realizado por:** Rea, P., Vásconez, K., 2019.

### 1.2.3 Efecto de los elementos de aleación en el aluminio

#### 1.2.3.1 Serie 1xxx:

Las aleaciones de la serie 1xxx, compuestas de 99 % o más de pureza de aluminio tiene muchas aplicaciones en el campo eléctrico y químico debido a su excelente resistencia a la corrosión, trabajabilidad, así como una alta conductividad eléctrica y térmica razón por la cual la serie 1xxx se usa frecuentemente para líneas de transmisión o red eléctrica. Se pueden obtener moderados aumentos en la resistencia mediante endurecimiento por deformación. El hierro y el silicio son las principales impurezas, (The Aluminum association, 2010). Se presentan ejemplos en la Figura 1-1.



**Figura 1-1.** Ejemplo de las aplicaciones de la serie 1xxx.

**Fuente:** (Miandi Group, 2019)

#### 1.2.3.2 Serie 2xxx:

En este grupo el cobre es el principal elemento de aleación. Estas aleaciones requieren tratamiento térmico en solución con lo que se puede conseguir propiedades mecánicas similares o en ocasiones superiores a las del acero dulce. En algunos casos, se emplea envejecimiento artificial para incrementar aún más las propiedades mecánicas. Las aleaciones de esta serie poseen una buena combinación de alta resistencia y tenacidad, pero no tienen buena resistencia a la corrosión atmosférica como la mayoría de las aleaciones de aluminio y en determinadas condiciones pueden estar expuestas a corrosión intergranular. Por lo tanto, para contrarrestar esta condición generalmente estas aleaciones están pintadas o revestidas con una aleación de alta pureza o una aleación de la serie 6xxx compuesta de magnesio y silicio que proporciona una protección galvánica para resistir en gran medida la corrosión. La aleación 2024 es la más popular debido a su uso en el campo de la aviación, (The Aluminum Association, 2019). Se presentan ejemplos en la Figura 2-1.



**Figura 2-1.** Serie 2xxx utilizada en el campo del transporte, aviación y aeronáutica

**Fuente:** (Miandi Group, 2019)

### 1.2.3.3 Serie 3xxx:

El manganeso es el principal elemento de aleación en este grupo, a menudo con pequeñas cantidades de magnesio. Dentro de estas aleaciones es popular la aleación 3003 para trabajos donde se requiera combinar una buena resistencia y trabajabilidad aplicándose así en intercambiadores de calor, utensilios de cocina, latas de aluminio para bebidas, (The Aluminum Association, 2019). Se presentan ejemplos en la Figura 3-1.



**Figura 3-1.** Serie 3xxx usada en intercambiadores de calor, latas de aluminio, y techos.

Fuente: (Miandi Group, 2019)

### 1.2.3.4 Serie 4xxx:

El principal elemento de aleación de este grupo es el silicio agregado con la finalidad de disminuir sustancialmente el punto de fusión sin producir fragilidad en las aleaciones resultantes, debido a esto este grupo de aleaciones se usa como aleaciones de soldadura fuerte donde se requiere un punto de fusión más bajo que el del metal original, también es usado en alambres de soldadura. Las aleaciones con cantidades significativas de silicio se tornan de color gris oscuro cuando se aplican acabados de óxido anódico y, por lo tanto, son demandadas en aplicaciones arquitectónicas. La aleación más conocida es la 4043 utilizada como relleno para soldar aleaciones de la serie 6xxx para aplicaciones automotrices y estructurales, (The Aluminum Association, 2019). Se presentan ejemplos en la Figura 4-1.



**Figura 4-1.** Serie 4xxx utilizada para alambres de soldadura y en la arquitectura.

Fuente: : (Miandi Group, 2019)

#### 1.2.3.5 Serie 5xxx:

El principal agente de aleación de esta serie es el magnesio, debido a su alta eficacia al combinarse con el aluminio. Las aleaciones de este grupo poseen características de alta resistencia, buena soldabilidad y resistencia a la corrosión en el medio marino. Debido a esto, las aleaciones de aluminio y magnesio son utilizadas ampliamente en para la construcción de tanques de almacenamiento, recipientes a presión y aplicaciones marinas. Algunos de los ejemplos de aplicaciones más comunes incluyen: la hoja anodizada 5005 para aplicaciones arquitectónicas, 5083 en aplicaciones marinas y vehículos de combate, 5052 en el campo de la electrónica, 5182 para latas de bebidas, (The Aluminum Association, 2019). Se presentan ejemplos en la Figura 5-1.



**Figura 5-1.** Serie 5xxx usada para automóviles, barcos y en tanques de almacenamiento.

Fuente: (Miandi Group, 2019)

#### 1.2.3.6 Serie 6xxx:

Esta serie contiene silicio y magnesio para formar siliciuro de magnesio dentro de la aleación, este grupo se caracteriza por ser versátil, tratable térmicamente, soldable, altamente conformable, y tiene una resistencia moderadamente alta junto con una excelente resistencia a la corrosión. Los productos de extrucción obtenidos de la serie 6xxx son la primera opción para aplicaciones arquitectónicas y estructurales, un ejemplo de su versatilidad fue la extrusión del iPhone 6 hecha de aleación de la serie 6xxx. La serie más conocida y utilizada es la 6061 para la construcción de fuselajes y alas de aviones donde se requiere una buena combinación entre ligereza y resistencia de sus componentes, también se utiliza ampliamente esta aleación en las industrias de construcción naval, automotriz y ferroviaria, (The Aluminum Association, 2019). Se presentan ejemplos en la Figura 6-1.



**Figura 6-1.** Aplicaciones arquitectónicas, estructurales y en la industria automotriz

Fuente: (Miandi Group, 2019)

### 1.2.3.7 Serie 7xxx:

El zinc es el principal elemento de aleación para esta serie, y cuando se agrega magnesio en pequeñas cantidades el resultado es una aleación con alta resistencia y tratable térmicamente. También se pueden añadir otros elementos como el cobre y el cromo en pequeñas cantidades. Las aleaciones comúnmente conocidas son 7075 y 7050, son ampliamente utilizadas en la industria aeronáutica. Estas aleaciones también han ganado espacio en la industria telefónica, el reloj de aluminio de Apple, lanzado en 2015, se fabricó con una aleación personalizada de la serie 7xxx, (The Aluminum Association, 2019). Se presentan ejemplos en la Figura 7-1



**Figura 7-1.** Serie 7xxx utilizada ampliamente en la aeronáutica.

Fuente: (Miandi Group, 2019)

## 1.3 Soldadura.

La American Welding Society (AWS) define una soldadura como “una coalescencia localizada (la fusión o unión de la estructura de granos de los materiales que se están soldando) de metales o no metales producida mediante el calentamiento de los materiales a las temperaturas de soldadura requeridas, con o sin la aplicación de presión, o mediante la aplicación de presión sola y con o sin el uso de material de aporte. En palabras menos técnicas la soldadura es un proceso en el cual se juntan piezas separadas ya sean de material similar o diferente, por medio de calor llegando a una temperatura lo suficientemente alta para producir fusión del material y de esta manera que fluyan juntas las piezas hasta su unión, si se aplica presión y material de aporte, esta unión tiene por objeto asegurar la continuidad de la materia entre dos elementos anteriormente separados, homogenizando sus propiedades y geometría, (Jeffus, 2009). Según la AWS estos procesos se clasifican en siete principales:

- Soldadura por arco
- Soldadura por resistencia
- Soldadura blanda
- Soldadura en estado sólido
- Soldadura con oxígeno y gas combustible
- Soldadura fuerte

- Soldaduras alternativas

### 1.3.1 Soldadura en estado sólido.

La soldadura en estado sólido corresponde a los procesos en los cuales se busca lograr la unión entre dos superficies mediante la combinación de calor y presión. La temperatura que se emplea en este proceso está por debajo del punto de fusión de los metales a soldar y generalmente no es necesario el uso de ningún material de aporte. Dentro de la soldadura en estado sólido se establece los siguientes procesos asociados como se muestra en la tabla 2-1 con su designación correspondiente:

**Tabla 2-1:** Designación de los procesos de soldadura en estado sólido

<b>Soldadura en Estado Sólido</b>	
<b>Proceso</b>	<b>Designación AWS</b>
Soldadura por coextrusión	CEW
Soldadura en frío	CW
Soldadura por difusión	DFW
Soldadura por presión isostática en caliente	HIPW
Soldadura por explosión	EXW
Soldadura por forja	FOW
Soldadura por fricción	FRW
Soldadura por fricción con impulso directo	FRW-DD
Soldadura por fricción agitación	FSW
Soldadura por fricción inercia	PRW-I
Soldadura a presión en caliente	HPW
Soldadura por rodillos	ROW
Soldadura ultrasónica	USW

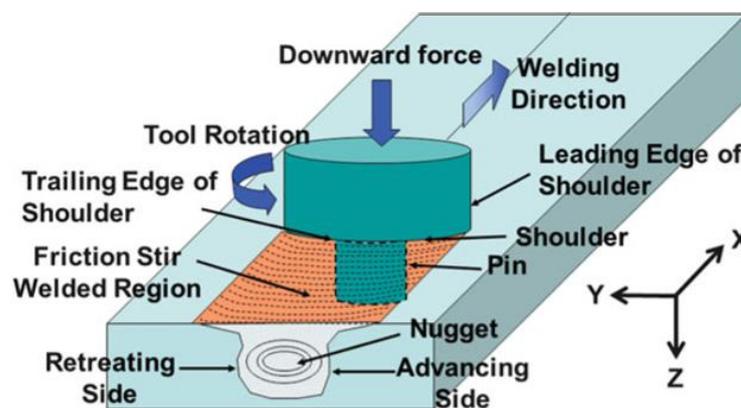
**Realizado por:** Rea, P., Vásconez, K., 2019.

La unión por difusión utiliza una presión que es lo suficientemente grande como para deformar localmente las concavidades y convexidades en las superficies contiguas. No se produce una deformación grave de la pieza de trabajo. Luego, a una temperatura alta por debajo de la temperatura de fusión de la pieza de trabajo, se permite que los átomos se difundan a través de la interfaz para llenar los vacíos restantes y completar el proceso de unión. Los procesos de unión por deformación utilizan presiones aplicadas por encima del límite elástico del trabajo, lo que provoca una deformación grave, obligando a los átomos de una superficie a entrar en contacto íntimo con los átomos de la segunda superficie. La atracción atómica proporciona el enlace.

Podemos proporcionar la presión al trabajo mediante varios métodos, que incluyen soldadura en frío, soldadura explosiva, soldadura de forja, soldadura por fricción, soldadura por presión en caliente, soldadura por rodillo y soldadura ultrasónica. La soldadura por fricción es única entre los procesos de estado sólido basados en la deformación debido a la forma en que el material fluye y se une para producir la unión. Si se hace correctamente, conduce a propiedades excepcionales y esa ha sido la razón principal de su implementación exitosa en numerosas aplicaciones, (Mishra, et al., 2014).

#### 1.4 Soldadura por Fricción-Agitación (FSW).

La soldadura por fricción - agitación (Stir-Welding o Friction Stir Welding – FSW) es un proceso que relaciona la dependencia del trabajo de fricción con el estado plástico al que llega la pieza, la fuente de calor que posee impide una fusión significativa en la pieza de trabajo, evitando muchas de las dificultades derivadas de un cambio de estado, como cambios en la solubilidad del gas y cambios volumétricos, que a menudo afectan los procesos de soldadura por fusión, la baja temperatura de soldadura hace posible una distorsión y tensiones residuales drásticamente más bajas, lo que permite un mejor rendimiento de la pieza. El FSW ayuda a encontrar nuevas técnicas de construcción y posibilita la soldadura de materiales muy delgados o muy gruesos, (Lohwasser & Chen, 2009).

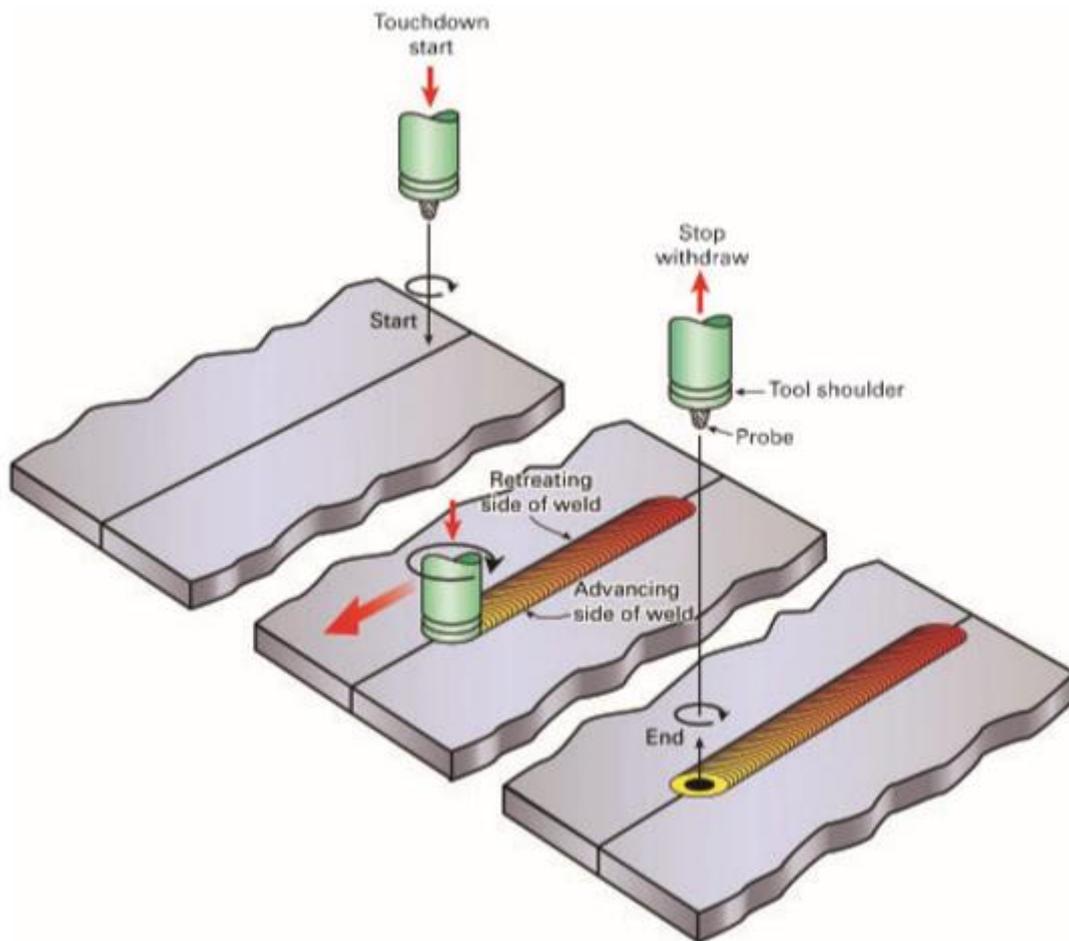


**Figura 8-1.** Serie 7xxx utilizada ampliamente en la aeronáutica  
Fuente: (Mishra, et al., 2014)

##### 1.4.1 Proceso de FSW

En el proceso FSW se realizan soldaduras mediante el uso de una herramienta de soldadura giratoria no consumible para ablandar localmente la pieza de trabajo, a través del calor producido por fricción y el estado plástico que llega el material, permitiendo que la herramienta “stir” (agite) la superficie de la junta. En este proceso una herramienta de soldadura giratoria no consumible, compuesta básicamente de dos cuerpos, un hombro y un pin, es insertada en la junta de soldadura

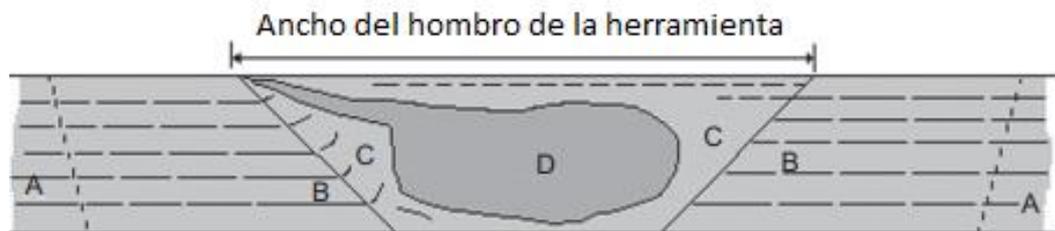
previamente preparada. Esta inserción se realiza por medio de una fuerza axial que general la herramienta previamente centrada desde donde se desea que inicie la soldadura, la penetración de la herramienta se lleva a cabo hasta que el hombro hace contacto con las superficies de las placas a soldar. El contacto provocado entre la superficie de las placas con el hombro de la herramienta y el pin de la herramienta con la placa, generan calor debido a la fricción, obteniendo una deformación del material. Insertada la herramienta entre las placas se procede al avance de la misma a lo largo de la junta. El avance de la herramienta más la rotación de la misma hace que la junta llegue a un estado plástico de material el cual es favorecido por la geometría de la herramienta. El material en estado plástico fluye entre las placas produciendo la unión entre ambas piezas gracias a la acción de mezclado que provoca la herramienta, obteniendo de esta manera un cordón de soldadura por FSW. La descripción gráfica de todo este proceso está ilustrada en la Figura 8-1, (Fernandez, et al., 2009).



**Figura 9-1.** Proceso FSW  
Fuente: (Threadgill, et al., 2009)

### 1.4.2 Zonas de la soldadura por fricción agitación

Durante el proceso de soldadura por fricción agitación se generan varias zonas que representan diferentes estados microestructurales de la junta soldada, (Mahoney, et al., 1998). En la figura 10-1 se indican estas diferentes regiones.



**Figura 10-1.** Zonas producidas en una soldadura por fricción.

Fuente: (Threadgill, et al., 2009)

#### 1.4.2.1 Zona mezclada

La región D corresponde a la zona recristalizada dinámicamente denominada nugget o zona mezclada que se forma debido a la intensa deformación plástica y el calentamiento por fricción generado durante FSW que dan como resultado la generación de una microestructura recristalizada de grano fino dentro de esta zona, (Threadgill, et al., 2009).

#### 1.4.2.2 Zona afectada termomecánicamente (TMAZ)

Etiquetada aquí como región C, la misma que es única y exclusiva del proceso FSW, esta zona también experimenta calor y deformación plástica pero estas características no son suficientes para conseguir una recristalización completa, (Mishra & Ma, 2005).

#### 1.4.2.3 Zona afectada por el calor (HAZ)

Representada por la región B en la Figura 10-1, esta región no sufre deformación plástica, pero al estar lo suficientemente cerca de la soldadura experimenta cambios en la microestructura y / o las propiedades debido al calor generado, (Liu & Ma, 2008)

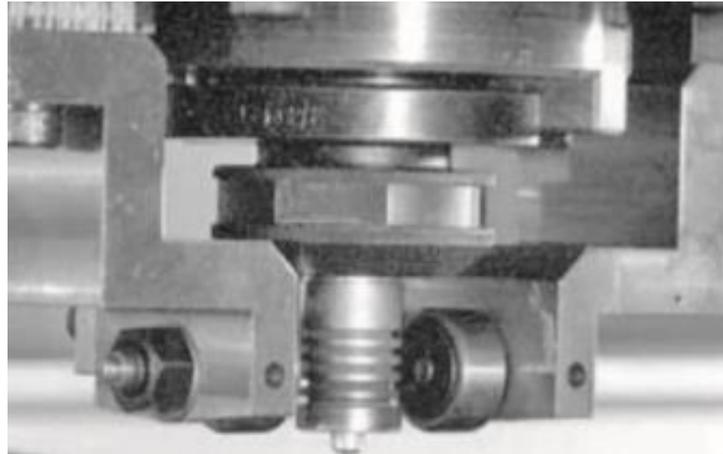
#### 1.4.2.4 Material base

Denominado también material no afectado debido a que no sufre cambios en la microestructura o en sus propiedades por estar alejado de la soldadura. Esta zona de acuerdo a la Figura 10-1 corresponde a la región A, (Cam & Mistikoglu, 2014).

### 1.4.3 Herramienta

La herramienta de agitación por fricción consiste en un pin o pasador y un hombro. El contacto del pasador con la pieza de trabajo crea un calentamiento por fricción y deformación y suaviza el

material de la misma; el contacto del hombro con la placa aumenta el calentamiento y expande la zona del material ablandado y restringe el material deformado. Naturalmente, la herramienta tiene efectos importantes durante la soldadura: desgaste abrasivo, alta temperatura y efectos dinámicos. Por lo tanto, los buenos materiales para herramientas tienen las siguientes propiedades: buena resistencia al desgaste, resistencia a altas temperaturas y buena tenacidad, (Chandrasekhar, et al., 2019). En la Figura 11-1 se observa un ejemplo de una herramienta de soldadura por fricción agitación colocada en el mandril para el inicio de la soldadura.

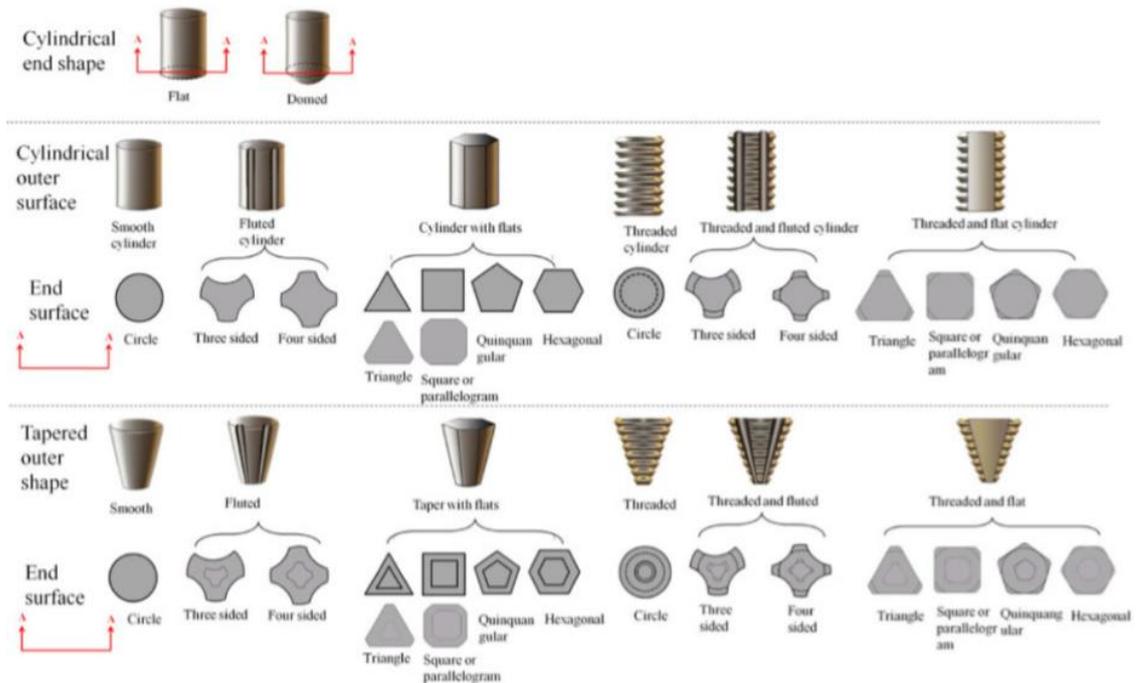


**Figura 11-1.** Herramienta de soldadura por fricción agitación.  
**Fuente:** (Lohwasser & Chen, 2009)

Por lo que se puede decir que existen dos aspectos importantes del diseño de la herramienta de soldadura por fricción: material de la herramienta y geometría, (Meilinger & Török, 2013).

#### *1.4.3.1 Geometría de la herramienta*

La experiencia ha demostrado que es ventajoso desarrollar un componente vertical para el flujo de material y, por lo tanto, la mayoría de las herramientas contienen en sus geometrías hilos, estrías helicoidales o características similares como se presenta en la Figura 12-1, para forzar a que el material adyacente al pasador fluya desde el hombro, siempre y cuando las placas a soldar sean de espesor grueso. Han surgido otras variantes a medida que el proceso madura, como herramientas en las que el pasador y el hombro giran independientemente (incluidos los hombros no giratorios), herramientas de pasador retráctil, así como una herramienta de bobina con un hombro en ambos extremos de un pasador de longitud igual al grosor de la placa, (Elangovan, et al., 2008)



**Figura 12-1.** Tipos de Geometrías de una herramienta de FSW

Fuente: (Zhang, et al., 2012)

En herramientas cilíndricas planas, de acuerdo al autor, (Dubourg & Dacheux, 2006), se puede usar la siguiente expresión matemática para determinar el diámetro del hombro.

$$d_h = 2.26e + 6.99$$

Donde:

$d_h$ : Diámetro del hombro [mm]

$e$ : Espesor de la placa [mm]

Para determinar el diámetro del pin se puede hacer uso de la siguiente tabla donde se recomiendan relaciones entre en diámetro del hombro y del pin que permiten hallar el valor del mismo.

**Tabla 3-1:** Dimensiones recomendadas de herramienta de soldadura

Shoulder diameter		Cylindrical pin diameter		Shoulder-to-pin ratio	Workpiece material and thickness, mm	Ref
mm	in.	mm	in.			
13	0.5	5	0.2	2.6:1	6061-T6 Al, 3 mm	9
20–30	0.8–1.2	8–12	0.3–0.5	2.5:1, 1.6:1	7050, 2195, 5083, 2024, 7075 Al, 6.35 mm	11
23	0.9	8.2	0.32	2.8:1	2024-T351 Al, 6.4 mm	20
20,16	0.8, 0.6	6	0.24	3.3:1, 2.7:1	5083 and 6061 Al, 5.5 mm	21
12	0.5	4	0.16	3:1	1050 Al and oxygen-free copper, 1.8 mm	23
25.4	1.0	7.87	0.31	3.22:1	7075-T7351 Al, 9.53 mm	24
23	0.9	8.4	0.33	2.7:1	2524-T351 Al, 6.4 mm	26
20	0.79	4	0.16	5:1	6064 Al to carbon steel, 4.5 mm	54
23	0.9	8.2	0.32	2.8:1	2024-T351, 7 mm	72
10	0.4	3.8	0.15	2.6:1	2095 Al, 1.63 mm	74
25	1.0	9	0.35	2.8:1	5251 Al, 5 mm	101

Fuente: (Mishra & Mahoney, 2007)

#### 1.4.3.2 Material de la herramienta

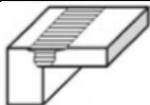
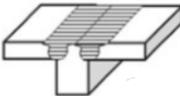
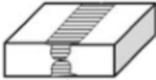
Las características del material de la herramienta pueden ser críticas para la soldadura por fricción agitación. El material de la herramienta que se usará depende del material de la probeta que se soldará y de la vida útil deseada de la herramienta, así como de las propias experiencias y preferencias del usuario. De forma ideal el material de la herramienta debería tener las siguientes propiedades: (Zhang, et al., 2012).

- Mayor resistencia a la compresión a temperatura elevada que las fuerzas de forja esperadas sobre la herramienta.
- Buena resistencia, estabilidad dimensional y resistencia a la fluencia.
- Buena resistencia a la fatiga térmica para resistir ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento.
- Buena tenacidad a la fractura para resistir el daño durante el hundimiento
- Bajo coeficiente de expansión térmica entre el pin y los materiales del hombro para reducir las tensiones térmicas.

#### 1.4.4 Tipos de junta

En las tablas que se muestran a continuación se observa los tipos de juntas que se pueden soldar por fricción agitación, se debe tener en cuenta que algunas discontinuidades son específicos de ciertos tipos de juntas.

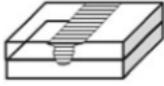
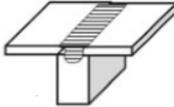
**Tabla 4-1:** Juntas a tope

Tipo de junta	Designación
	Tope cuadrado de un solo lado
	Tope de borde
	Junta a tope en T
	Tope cuadro de doble lado utilizado para placas gruesas
	Soldaduras tubulares con junta a tope

Fuente: (Mishra, et al., 2014)

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

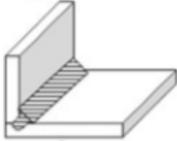
**Tabla 5-1:** Juntas traslapadas

Tipo de junta	Designación
	Junta de solape
	Junta de regazo múltiple
	Junta de regazo en T

Fuente: (Martinez, 2015)

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

**Tabla 6-1:** Juntas tipo filete

Tipo de junta	Designación
	Junta de rellena

Fuente: (Martinez, 2015)

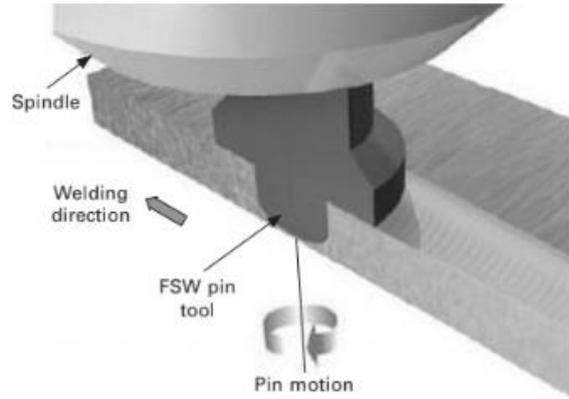
Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

#### **1.4.5 Equipo FSW**

Hay muchos tipos diferentes de máquinas utilizadas para FSW. Algunos están configurados para una aplicación específica y otros tienen una configuración más general que les permite soldar una gama más amplia de piezas. Para determinar los requisitos para el equipo FSW, uno debe comprender el rango de rendimiento que se requiere del proceso para las piezas a soldar. Los cuatro parámetros críticos del proceso que controla la máquina FSW son la posición de la herramienta de pin, orientación, cargas, rotación y velocidades de desplazamiento. Un buen punto de partida para especificar los requisitos es decidir el tipo de soldadura que se va a realizar; pin fijo, pin ajustable o autoajustable.

##### **1.4.5.1 Equipo para pin fijo**

La herramienta de pasador o pin FSW es una pieza que consta tanto del hombro como del pin. La soldadura de pin fijo es la forma más tradicional de FSW y es la más fácil de administrar desde una perspectiva de diseño y control de la máquina. Cualquier movimiento del eje del cabezal de soldadura se traduce en un cambio asociado en la posición y las cargas del hombro y el pasador, (Lohwasser & Chen, 2009).

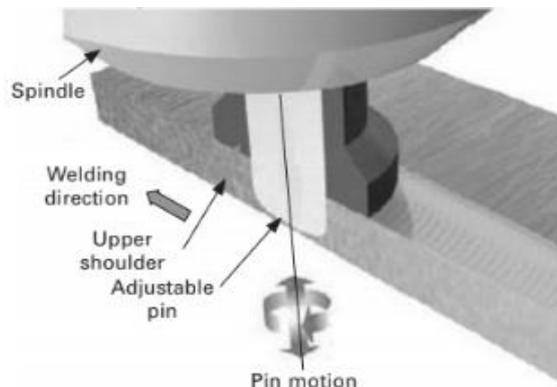


**Figura 13-1.** Equipo para pin fijo

Fuente: (Lohwasser & Chen, 2009)

#### 1.4.5.2 Equipo para pin ajustable

La herramienta de pasador FSW consta de dos piezas: un pasador y un hombro, que pueden moverse independientemente uno del otro. Este método de soldadura permite una mayor flexibilidad en la soldadura de piezas. Por ejemplo, piezas cónicas (es decir, piezas con grosor variable) se puede mantener la distancia de la punta del pasador a la parte posterior de la soldadura. Desde la perspectiva del diseño de la máquina, la soldadura de pasador ajustable requiere un diseño de la máquina algo más complejo y un esquema de control, (Lohwasser & Chen, 2009).

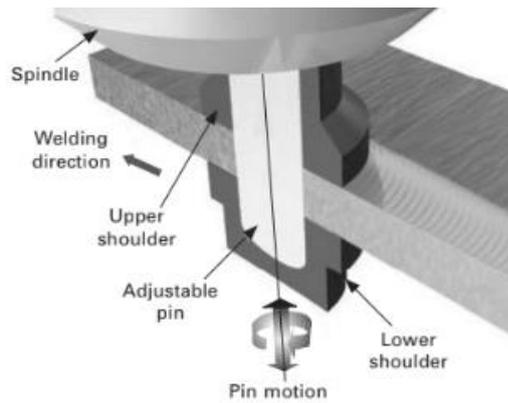


**Figura 14-1.** Equipo para pin ajustable

Fuente: (Lohwasser & Chen, 2009)

#### 1.4.5.3 Equipo para pin autoajustable

La herramienta con pin autoajustable consta de tres piezas; un hombro superior, un alfiler y un hombro inferior. Desde una perspectiva de diseño y control de la máquina, en realidad solo hay dos piezas para controlar, ya que el pasador y el hombro inferior están unidos entre sí. Los hombros superior e inferior permanecen en las superficies superior e inferior de la pieza a medida que el pasador se mueve a través de toda la sección transversal del material. La soldadura autoajustable tiene las ventajas de garantizar la penetración, (Lohwasser & Chen, 2009).



**Figura 15-1.** Equipo para pin autoajustable

Fuente: (Lohwasser & Chen, 2009)

#### 1.4.6 Aplicaciones

Los campos donde FSW podría aplicarse haciendo uso de sus características son amplios y pueden ser: la industria petroquímica, los sectores eléctricos y mecánicos, las estaciones de energía eléctrica, ferrocarriles, energía nuclear, aeroespacial, automóvil, máquinas herramientas y materiales metálicos. La aplicación comenzó en las áreas de soldadura lineal a tope de materiales continuos donde las características de FSW se utilizan con mayor eficacia, y se ha desarrollado en los campos que requieren la soldadura de circunferencia, cilindros, juntas curvilíneas, juntas tridimensionales. Esta soldadura tiene un gran volumen de aplicaciones y está esperando un mayor desarrollo en varias áreas, (Fukuda, 2001). Las principales razones para aplicar FSW son las siguientes:

- Los productos pueden volverse más livianos debido a la mejora en la resistencia mecánica de la unión de soldadura.
- La productividad puede mejorarse debido a la reducción de muchos procesos como la inspección, y en consecuencia los costos totales pueden reducirse.
- Se pueden unir materiales que por medio de soldadura por fusión es difícil de hacerlo.



**Figura 16-1.** Aplicaciones del FSW.

Fuente: (Lohwasser & Chen, 2009)

## CAPÍTULO II

### 2 MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe: equipos, materiales, reactivos y ensayos que fueron usados para la obtención de las placas soldadas por fricción agitación.

#### 2.1 Materiales y equipos

##### 2.1.1 Placas de experimentación.

Para el proceso de soldadura se utilizaron planchas de aleaciones de aluminio 1100 y 6061 de espesor 3mm que fueron adquiridas en la empresa Prometal de la ciudad de Ambato. Las dimensiones de las placas con las que se trabajaron durante la experimentación y determinación de parámetros de soldadura optima fueron 120x60x3 [mm]. La composición química y propiedades mecánicas de la aleación de Aluminio 1100 y 6061 se presentan en las tablas 1-4 respectivamente:

**Tabla 1-2:** Composición química de la aleación de aluminio 1100 en porcentaje de peso

Al	Si y Fe	Cu	Mn	Zn
99.0	0.95	0,10	0,03	0,1

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

**Tabla 2-2:** Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 1100

<b>0.2 % Limite Elástico</b> (MPa)	<b>Esfuerzo Ultimo</b> (MPa)	<b>Elongación</b> %	<b>Dureza microvickers</b> (HV)
34	50	6	40

Fuente: (Masterbond, s.f.)

**Tabla 3-2:** Composición química de la aleación de aluminio 6061 en porcentaje de peso

<b>Mg</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>
0.99	0.5	0.6	0.25	0.03	0.07	0.19

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

**Tabla 4-2:** Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6061

<b>0.2 % Limite Elástico</b> (MPa)	<b>Esfuerzo Ultimo</b> (MPa)	<b>Elongación</b> %	<b>Dureza microvickers</b> (HV)
275	80	7	55

Fuente: (Madhusudhan, et al., 2009)

### 2.1.2 *Equipo utilizado.*

Para el procedimiento de soldadura se utilizó una “Fresadora CNC ROMI D600”, Figura 1-2, perteneciente a la Facultad de Mecánica-ESPOCH. En cuanto a la programación y control de los parámetros de soldadura como velocidad de avance, rotación y penetración se usó el software CIMCO.

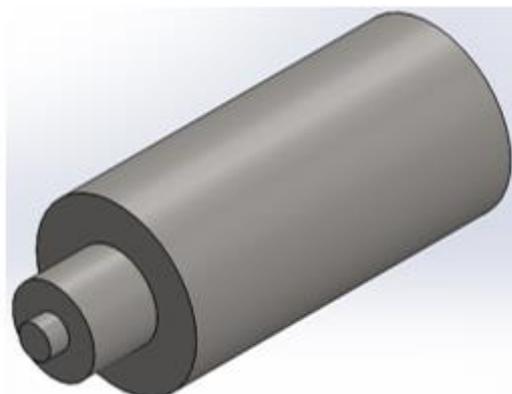


**Figura 1-2.** Fresa CNC

Realizado por: Rea, P., Vásquez, K., 2019.

### 2.1.3 *Herramienta de soldadura.*

La herramienta utilizada fue de una geometría estándar es decir forma cilíndrica plana como se indica en la Figura 2-2. El material seleccionado fue un acero 4340 mismo que se encuentra dentro de las opciones para la soldadura por fricción de placas de aluminio de acuerdo con (Zhang, et al., 2012). Este acero posee un excelente comportamiento frente a temperaturas elevadas además de buenas propiedades de resistencia a la tensión y al desgaste. Es importante señalar que no se realizó ningún tratamiento térmico en el material de la herramienta, ya que las pruebas preliminares no mostraron problemas significativos en términos de durabilidad de la herramienta.



**Figura 2-2.** Representación geométrica de la herramienta de soldadura

Realizado por: Rea, P., Vásquez, K., 2019.

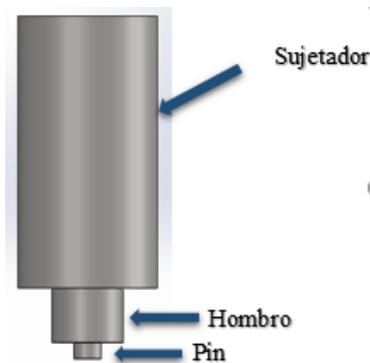
### 2.1.3.1 Partes de la herramienta de soldadura

La herramienta está conformada de tres partes: sujetador, hombro y pin, como se indica en la Figura 3-2.

El sujetador: debe poseer la longitud y el diámetro necesarios para engancharse en el acople del eje de la Fresa CNC.

El hombro: es el encargado de generar presión sobre las placas a soldarse evitando así que el material unido salga disparado.

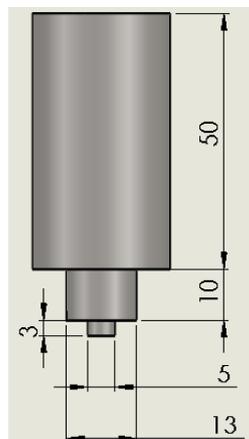
El pin: es el encargado de sumergirse en los bordes contiguos de las placas y se mueve a lo largo de la línea de separación con una velocidad de rotación que produce fricción. En la soldadura a tope, la longitud del pin generalmente es muy cercana o igual al espesor de las piezas de trabajo. Es importante mencionar que las soldaduras realizadas fueron con penetración completa de la longitud del pin, es decir 3m



**Figura 3-2.** Partes de la herramienta.

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

El presente trabajo no se enfoca en el diseño de herramienta es por eso que estos datos se tomaron un trabajo anteriormente realizado (Toapanta, 2015), el cual trabajó con el mismo material aluminio, las dimensiones de la herramienta se presentan en la Figura 4-2. La herramienta fue mecanizada en un torno CNC.



**Figura 4-2.** Dimensiones de la herramienta (mm)

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

## 2.2 Parámetros de soldadura.

En nuestro trabajo de experimentación para poder encontrar los valores de velocidad de rotación y avance óptimos se realizaron varias soldaduras en diferentes condiciones, en la tabla 6-2 y 7-2 se muestra las diferentes pruebas que se llevaron. Como punto de partida se tomó los valores recomendados por (Mishra, et al., 2014), indicados en la Figura 5-2 se tomaron los valores para Aleación 1100 y 6061.

**Tabla 5-2:** Parámetros de velocidades recomendados

Material	Plate thickness (mm)	Tool geometry	Rotation rate (rpm)	Traverse speed (mm/min)
7075Al-T6	6.35	–	–	127
6061Al-T6	6.3	Cylindrical	300–1000	90–150
Al–Li–Cu	7.6	–	–	–
7075Al-T651	6.35	Threaded, cylindrical	350, 400	102, 152
6063Al-T4, T5	4.0	–	360	800–2450
6013Al-T4, T6	4.0	–	1400	400–450
1100Al	6.0	Cylindrical	400	60
5054Al	6.0	–	–	–
1080Al-O	4.0	–	–	–
5083Al-O	6.0	–	–	–
2017Al-T6	3	Threaded, cylindrical	1250	60
2095Al	1.6	–	1000	126–252
Al–Cu–Mg–Ag–T6	4.0	–	850	75
2024Al-T351	6.0	–	–	80
7010Al-T7651	6.35	–	180, 450	95
7050Al-T651	6.35	–	350	15
Al–4Mg–1Zr	10	Threaded, cylindrical	350	102
2024Al	6.35	Threaded, cylindrical	200–300	25.4
7475Al	6.35	–	–	–
5083Al	6.35	Threaded, cylindrical	400	25.4
2519Al-T87	25.4	–	275	101.6

Fuente: (Mishra, et al., 2014)

**Tabla 6-2:** Juntas soldadas de aluminio 1100 de 3mm de espesor.

Velocidad rotación (rpm)	Velocidad de Avance (mm/min)	Apariencia de la Superficie
400	60	
650	40	
650	60	

Continua

Continua

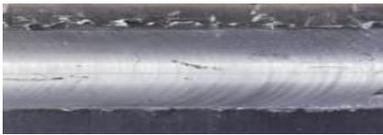
900	60	
1000	80	
1300	90	
1600	100	
1800	105	
2000	110	
2500	120	

Realizado por: Rea, P., Vázquez, K., 2019.

**Tabla 7-2:** Juntas soldadas de aluminio 6061 de 3mm de espesor.

Velocidad rotación (rpm)	Avance (mm/min)	Apariencia de la Superficie
300	90	
650	120	
1000	150	

Continua

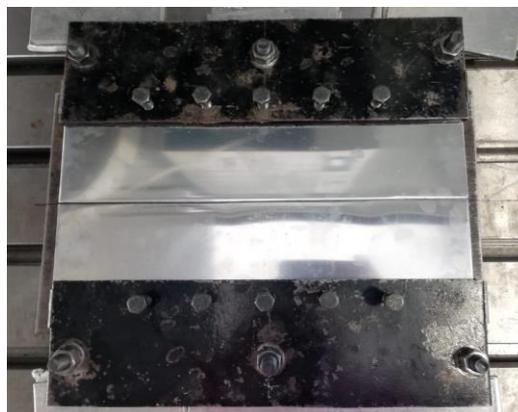
1300	140	
1500	130	
1800	110	
1900	100	

Realizado por: Rea, P., Vázquez, K., 2019.

### 2.3 Sistema de sujeción

Para efectuar un correcto proceso de soldadura es de suma importancia garantizar una buena sujeción de las placas sobre la mesa de la Fresadora CNC con el objetivo de evitar rotaciones, desplazamientos transversales o longitudinales de las misma, razón por la cual se adaptó el siguiente sistema como se indica en la Figura 5-2, que consta de dos placas de acero con agujeros que permiten la introducción de espárragos que son los encargados de sujetar las placas soldadas. Las medidas de las placas se encuentran en los planos del Anexo D.

También es necesario apoyar las piezas de trabajo sobre otra placa que las contenga para evitar que estas sean dobladas o flejadas con la presión de la herramienta.



**Figura 5-2.** Sistema de sujeción

Realizado por: Rea, P., Vázquez, K., 2019.

## 2.4 Procedimiento para soldar aluminio por fricción-agitación

Se siguió los siguientes pasos para la obtención de las placas soldadas por fricción agitación:

1. Puesta en marcha de la fresadora CNC.
2. Preparación de las placas a soldar, incluye limpieza y alineación de los bordes de las mismas.



**Figura 6-2.** Placas a soldar

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

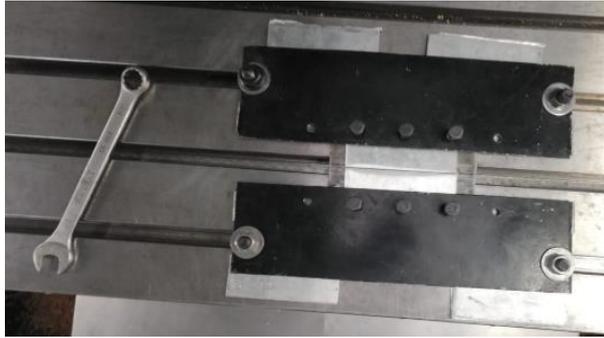
3. Colocación de la herramienta en el mandril de la fresadora CNC.



**Figura 7-2.** Herramienta de soldadura

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

4. Fijación del sistema de sujeción de placas con junta a tope.



**Figura 8-2.** Instrumentos para fijación

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

5. Escritura del código en el programa CIMCO para la fresadora CNC con los parámetros adecuados para soldar cada tipo de material.

```

4 G53 X0 Y0
5 G90 G54
6 G290
7 M6 T3
8 G54 D1
9 G291
10 G54
11 G17 G0 X0Y0 S2500 M3
12 Z10.5
13 Z2.
14 G01 Z0.2 F100.
15 G01 Z-3 F120.
16 G04 X3.
17 G01 X-125.
18 G0 Z50.
19 M05
20 M30
  
```

Annotations in the image:

- Velocidad de rotación: points to S2500 in line 11.
- Velocidad de avance: points to F100. in line 14 and F120. in line 15.
- Profundidad de penetración: points to X3. in line 16.
- Tiempo de precalentamiento: points to G04 in line 16.

**Figura 9-2.** Línea de código usada en el programa CIMCO

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

6. Calibración de la herramienta con las placas en los ejes x, y, z.



**Figura 10-2.** Calibración de herramienta de soldadura

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

7. Penetración completa de la herramienta en el inicio de la junta a tope.
8. Tiempo de espera antes de iniciar la soldadura, que fue de 3 segundos.
9. Inicio del soldado de placas.



**Figura 11-2.** Inicio de soldado

Realizado por: Rea, P., Vásquez, K., 2019.

10. Llenado de las hojas WPS de soldadura que se obtienen de la norma AWS D17.3, cuya estructura consta en el Anexo A.

## 2.5 Inspección visual

Después de realizar la soldadura por fricción agitación en las placas finales se hizo un análisis de inspección visual antes de continuar con los ensayos mecánicos, con la finalidad de descartar discontinuidades que se pudieron haber producido durante la soldadura se utilizó los instrumentos que se detallan en las siguientes figuras:

1. Bridge Cam: esta galga ayuda a medir alineación entre placas, socavaduras, exceso de soldadura o falta de penetración.



**Figura 12-2.** Bridge cam

Realizado por: Rea, P., Vásquez, K., 2019.

2. Magnificador: ayuda a tener una mejor visualización para encontrar discontinuidades superficiales que puedan encontrarse en la soldadura como fisuras, picaduras, entre otros.



**Figura 13-2.** Magnificador

Realizado por: Rea, P., Vásquez, K., 2019.

## **2.6 Metodología para toma de ensayos.**

Después de la obtención de las placas soldadas se debe realizar ensayos para comprobar si la soldadura es lo suficientemente resistente comparada con el material base, los ensayos realizados fueron basados en normas que serán especificados en los siguientes literales. El corte de las probetas para los ensayos se realizó por chorro de agua para que las mismas no sean afectadas por la temperatura de otros tipos de corte.

### **2.6.1 Tracción.**

#### **2.6.1.1 Equipo**

Los ensayos de tracción se realizaron en la maquina universal presente en el Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero del Gobierno Provincial de Tungurahua de una capacidad de 1500 KN.

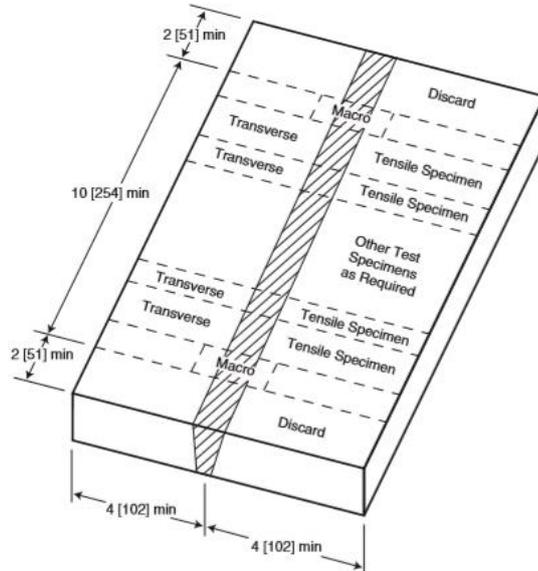


**Figura 14-2.** Máquina Universal

Realizado por: Rea, P., Vásquez, K., 2019.

### 2.6.1.2 Norma

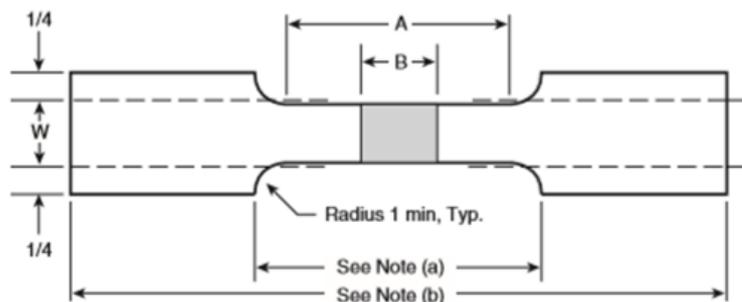
La norma en la que nos basamos fue la AWS D17.3/D17.3M:2016 An American National Standard, Especificaciones de la soldadura por fricción agitación de aleaciones de aluminio para aplicaciones aeroespaciales. En esta norma se especifica las medidas estándares de la placa a soldar, que para nuestro caso en específico es una junta a tope, y de donde se deben obtener las muestras o especímenes como podemos observar en la Figura 15-2.



**Figura 15-2.** Obtención de los especímenes para tracción

Fuente: (American Welding Society, 2016)

La misma norma nos brinda las medidas mínimas que debe tener la probeta de tracción presente en la Figura 16-2.



**Figura 16-2.** Especimen de ensayos de tracción.

Fuente: (American Welding Society, 2016)

Donde:

A: El largo de la sección reducida A deberá ser igual a la B sumada  $\frac{1}{2}$  in [13mm] o a su vez debe ser mínima a  $2 \frac{1}{4}$  in [57mm]

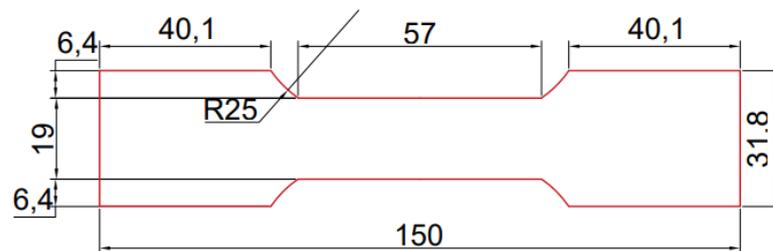
B: La dimensión de B debe ser igual a la dimensión más grande del Cordón de soldadura en la dirección longitudinal del eje de la muestra

Nota a: Esta sección deberá ser cortada por mecanizado o rectificado

Nota b: El largo de la muestra estará de acuerdo a lo requerido por el equipo de prueba de tensión.

### 2.6.1.3 Probetas

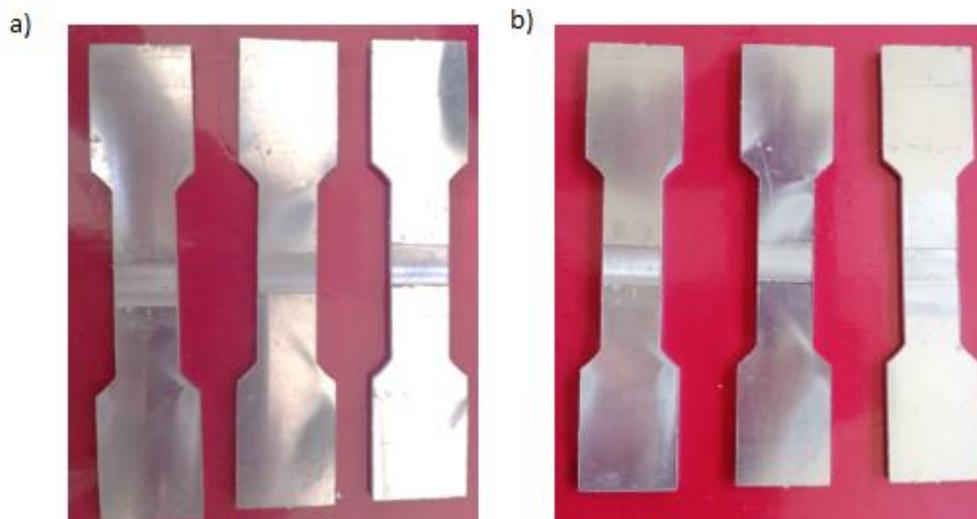
De acuerdo a lo propuesto anteriormente el espécimen para ensayos a tracción quedó con las siguientes medidas en mm como se muestra en la Figura 17-2.



**Figura 17-2.** Especimen de ensayos a tracción con medidas en mm

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

Después del corte respectivo por chorro de agua como se especificó anteriormente se obtuvo 3 de cada aleación placas listas para proceder a ensayar como se puede ver en las siguiente Figuras:



**Figura 18-2.** Probetas cortadas para tracción de material a) 1100 b) 6061

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

## 2.6.2 Doblado.

### 2.6.2.1 Equipo

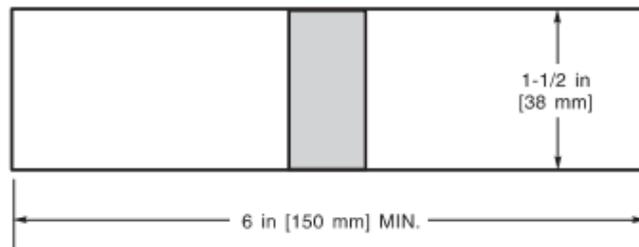
De igual manera que los ensayos de tracción, los ensayos de doblado se realizaron en la maquina universal presente en el Centro de fomento productivo metalmecánico carrocerero perteneciente al gobierno provincial de Tungurahua de una capacidad de 1500 KN y con la ayuda de los apoyos respectivos usados para el doblado como se muestra en la Figura 19-2.



**Figura 19-2.** Apoyos para ensayos de doblado  
**Realizado por:** Rea, P., Vásquez, K., 2019.

#### 2.6.2.2 Norma

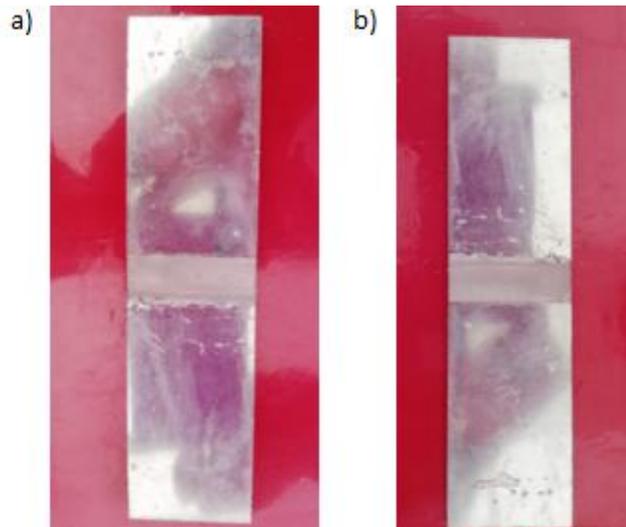
La norma usada fue la AWS D1.2/D1.2M:2014 An American National Standard. Código de Soldadura Estructural de Aluminio. De esta norma se tomaron las medidas recomendadas para las probetas de doblado como se puede ver en la siguiente Figura 20-2. Existen dos tipos de doblados, de cara y de raíz, para este caso resolvimos realizar doblado de cara.



**Figura 20-2.** Espécimen de ensayos de doblado  
**Fuente:** (American Welding Society, 2013)

#### 2.6.2.3 Probetas

Después del corte respectivo por chorro de agua como se especificó anteriormente se obtuvo 1 de cada aleación palcas listas para proceder a ensayar como se puede ver en las siguiente Figuras:



**Figura 21-2.** Probetas cortadas para doblado de material a)1100 b)6061  
**Realizado por:** Rea, P., Vásconez, K., 2019.

### 2.6.3 Dureza.

#### 2.6.3.1 Equipo

El equipo de dureza usado se encuentra en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, el cual mide Microdureza Vickers, de marca BUEHLER que posee las siguientes características: voltaje: 120VAC y frecuencia: 60Hz.



**Figura 22-2.** Equipo de microdureza Vickers  
**Realizado por:** Rea, P., Vásconez, K., 2019.

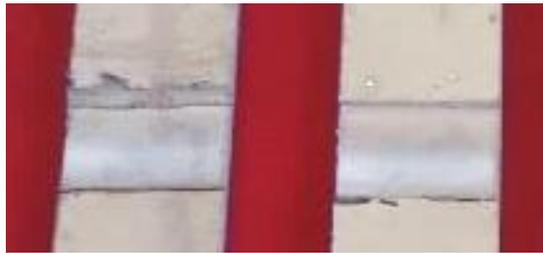
#### 2.6.3.2 Norma

La norma usada para ASTM E 384 – 05 Método Estándar de Microidentación de Dureza de Materiales de la que nos ayudamos para obtener las durezas respectivas de todas las zonas

presentes en las placas soldadas por fricción agitación, (ASTM International, s.f.). La carga usada para las pruebas fue de 2 Kg y la medición de durezas fue cada 3 mm tomando como posición referencial el centro del cordón de soldadura (nugget), se tomó seis medidas a la derecha, seis hacia la izquierda y una en el centro de referencia.

### 2.6.3.3 Probetas

Las probetas usadas para realizar pruebas de dureza fueron 2, una de cada material 1100 y 6061 como se puede observar en la siguiente Figura:



**Figura 23-2.** Probetas para ensayos de Microdureza  
Realizado por: Rea, P., Vásquez, K., 2019.

## 2.7 Metodología para análisis metalográficos.

Los ensayos metalográficos fueron realizados en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo con los insumos respectivos, y la metalografía fue observada en el microscopio óptico de marca BUEHLER LTD de voltaje: 110 V y frecuencia: 60 Hz.



**Figura 24-2.** Microscopio óptico.  
Realizado por: Rea, P., Vásquez, K., 2019.

### **2.7.1 Macrografía**

De la norma AWS D17.3, (American Welding Society, 2016) se determinó el lugar de la placa de donde se obtiene el espécimen para la macrografía, para la preparación de la placa se usó la norma ASTM E3-11 Guía Estándar para la Preparación de Especímenes Metalográficos ,(ASTM International, 2016), se obtiene una macrografía para poder determinar donde se encuentran las zonas que se generan la soldadura por fricción, las muestras fueron atacadas con el reactivo Tucker's (45mL HCL + 15 mL HNO<sub>3</sub> + 15 mL HF + 25 mL H<sub>2</sub>O).

### **2.7.2 Micrografía**

La norma que se usó para la preparación de las placas es la ASTM E03 - 11 Guía Para la Preparación de Especímenes Metalográficos, las muestras fueron atacadas con Ácido Fluorhídrico (HF) al 0,5%.

## CAPÍTULO III

### 3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1 Parámetros de soldadura

Luego de las experimentaciones e inspección visual de las juntas soldadas se eligió los parámetros finales que se muestran en la tabla 1-3 Con estos se procedió a la realización de las placas definitivas que serán sometidas a ensayos mecánicos y análisis metalográfico.

**Tabla 1-3:** Parámetros Finales

Tipo de Aleación de Aluminio	Parámetros
1100	Velocidad de rotación:2500 rpm Velocidad de avance:120 mm/min
6061	Velocidad de rotación:1900 rpm Velocidad de avance:100 mm/min

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

#### 3.2 Inspección visual

De acuerdo a los criterios de aceptación de la norma AWS D17.3/D17.3M:2016 An American National Standard, Especificaciones de la soldadura por fricción agitación de aleaciones de aluminio para aplicaciones aeroespaciales, las juntas soldadas pasan la inspección y se procede a realizar los ensayos respectivos.

#### 3.3 Análisis metalográfico

##### 3.3.1 Macro y micro estructura

La Figura 1-3 y la Figura 3-3 muestran la macroestructura encontradas en las juntas de Aleación 1100 y 6061 respectivamente. Las zonas que claramente se identifican en estas dos figuras son “Nugget zone” (NZ), “Thermo-mechanical affected zone” (TMAZ), “Heat affected zone” (HAZ) y “Base metal” (BM) y están en concordancia con las observaciones de la literatura (Mishra, et al., 2014), (Mishra & Ma, 2005) y (Threadgill, et al., 2009). En las dos figuras también se identifican el “Advancing side” lado de avance, denominado así debido a que la dirección de rotación de la herramienta es la misma que la dirección de avance, y el “Retreating side” lado de retirada donde ocurre lo contrario y la dirección de rotación de la herramienta es opuesta al avance.

El lado de avance es claramente notorio y visible a relación de lado de retirada que se torna difuso, en el lado de avance se visualiza la transición de la NZ a la TMAZ como se observa en la Figura 1-3 y la Figura 3-3, la razón de esto se debe a que al coincidir las direcciones de rotación y avance

el “Advancing side” sufre mayor impacto mecánico y de calor con relación al “Retreating side” en donde se aloja el material producto de la mezcla.

Se observa que la NZ empieza a ensancharse desde la parte inferior del cordón de soldadura hasta llegar a tener un gran tamaño en la parte superior debido al contacto directo con el hombro de la herramienta, en las dos placas soldadas se obtuvieron estas características de forma y tamaño. De acuerdo a la Figura 2-3 a) y Figura 4-3 a) se observa que esta región está formada por granos finos y equiaxiales consecuencia de una recrystalización dinámica producida por la alta deformación plástica y temperatura, también se puede notar que no existe presencia de ningún tipo de discontinuidad en ambos casos. De acuerdo a la Figura 2-3 a) perteneciente a la aleación 1100 la región nugget contiene cierto número de precipitados finos y pequeños de  $FeAl_3$ . En la Figura 4-3a) esta misma zona correspondiente a la aleación 6061 también contiene pequeños precipitados de  $Fe_3SiAl_{13}$  y  $Mg_2S$ . Para ambos casos los precipitados fueron producto del proceso FSW.

En cuanto a la Thermo-mechanical affected zone de acuerdo a la Figura 2-3 b) y Figura 4-3 b) se puede observar los granos menos refinados en comparación con la “Nugget Zone”, la estructura de los granos está altamente deformados, pero no logran recrystalizarse. El alargamiento de los granos coincide con el sentido de rotación de la herramienta. En los dos tipos de aleación los precipitados son más gruesos en comparación con la zona de agitación. Con respecto a la región Heat affected, ubicada seguidamente de la TMAZ, el único factor que produce una ligera afectación es el calor, en esta región no ocurre deformación plástica y la estructura del grano es muy parecida a la del metal base como se visualiza en la Figura 2-3 c) y Figura 4-3 c). Para los dos tipos de aleaciones de aluminio en esta región no hay cambio significativo en el tamaño de los precipitados en comparación con el material base.

Las imágenes de la Figura 2-3 c) y la Figura 4-3 c) corresponden al metal base de los materiales, los mismos que no son afectados durante el proceso de soldadura. La Figura 2-3 c) corresponde a una aleación de aluminio 1100 compuesta por partículas insolubles  $FeAl_3$  de acuerdo a lo indicado en la referencia, (Metal Handbook vol. 7, 1972). La Figura 4-3 c) corresponde a una aleación de aluminio 6061 compuesta por partículas insolubles  $Fe_3SiAl_{13}$  y  $Mg_2S$  de acuerdo a lo indicado en la referencia, (Metal Handbook vol. 7, 1972).

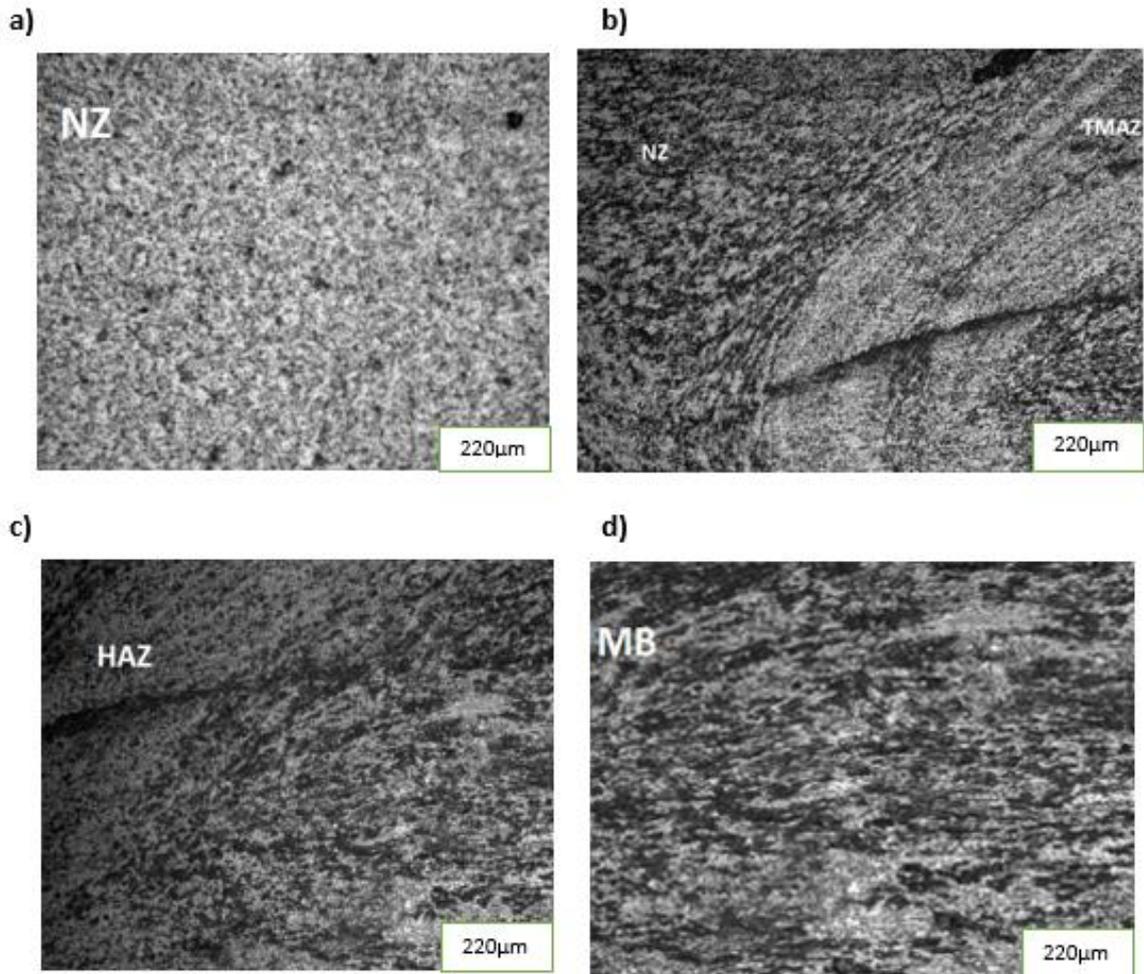
En ambos casos los precipitados se mantienen en su forma y tamaño y no han sido afectados por ningún parámetro que intervino en el proceso de FSW. Es importante mencionar que en las fotografías no se observa claramente el tamaño de los precipitados, pero en el microscopio óptico era notorio el cambio de esta característica en las diferentes zonas, el tamaño de grano de las distintas zonas formadas no fue posible cuantificar consecuencia de un sobre ataque químico que ocurrió en las muestras.

### 3.3.1.1 Aluminio 1100



**Figura 1-3.** Macrografía de la probeta de aleación de aluminio 1100

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.



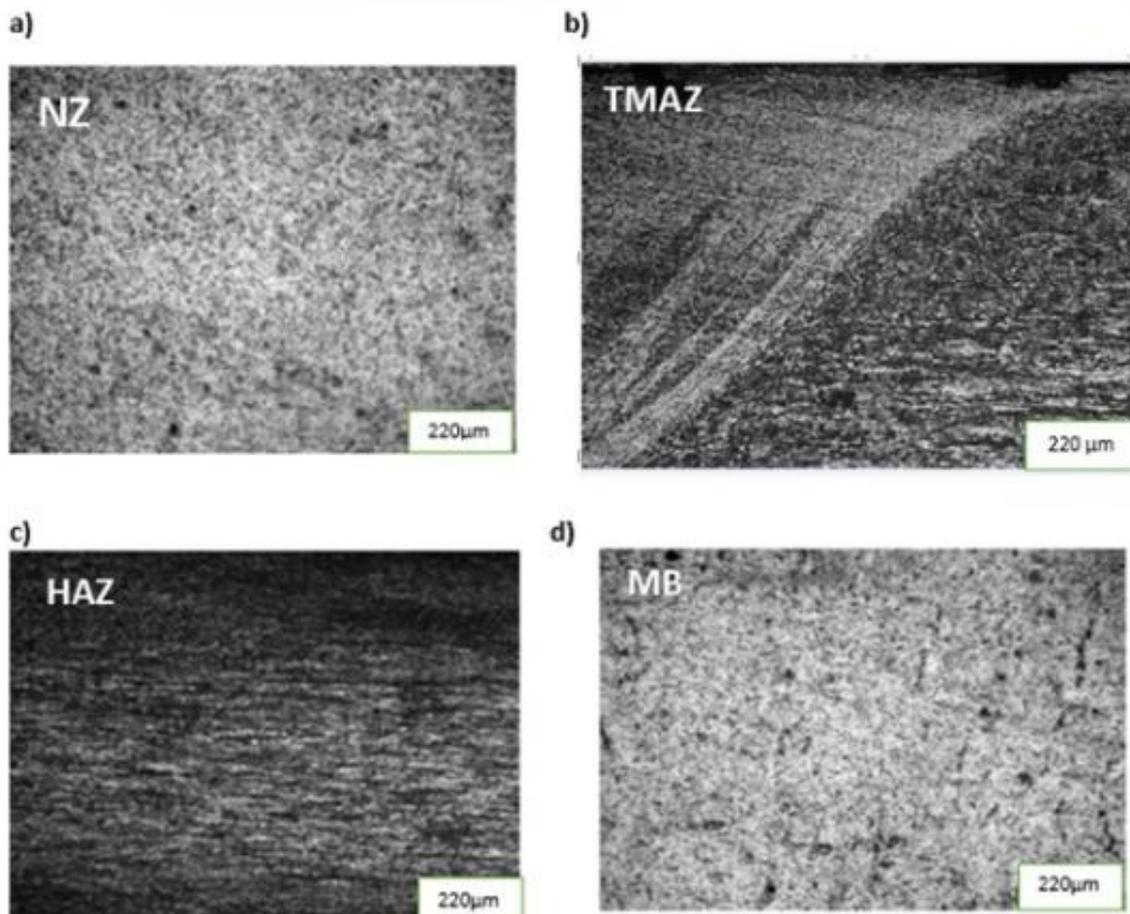
**Figura 2-3.** Microestructura de la junta soldada por FSW de una aleación de aluminio 1100:  
a)NZ; b)Sección límite entre NZ a TMAZ; c)HAZ; d)Metal base de la aleación.

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

### 3.3.1.2 Aluminio 6061



**Figura 3-3.** Macrografía de la probeta de aleación de aluminio 6061  
Realizado por: Rea, P., Vásquez, K., 2019.



**Figura 4-3.** Microestructura de la junta soldada por FSW de una aleación de aluminio 6061: a)NZ; b)Sección límite entre NZ a TMAZ; c)HAZ; d)Metal base de la aleación.

Realizado por: Rea, P., Vásquez, K., 2019.

### 3.4 Propiedades mecánicas.

La evolución y el cambio microestructural observado en todas las regiones de la junta soldada conducen a un cambio sustancial en las propiedades mecánicas de la soldadura.

### **3.4.1 Dureza**

Los perfiles de dureza obtenidos de las secciones transversales de las muestras sometidas a FSW se presentan en la Gráfica 1-3 y Gráfica 2-3 para la aleación de aluminio 1100 y 6061 respectivamente.

De acuerdo a la Gráfica 1-3 la dureza máxima corresponde a 47 Hv y pertenece a la “nugget zone”, esta dureza es superior a la del material base que tiene 40 Hv. La dureza va disminuyendo conforme se acerca a la HAZ en donde alcanza el valor mínimo (29,3Hv) en el lado de Advancing side. De acuerdo a la Gráfica 2-3 la dureza máxima corresponde a 56,4 Hv y pertenece a la “nugget zone”, esta dureza es superior a la del material base que tiene 55 Hv. La dureza va disminuyendo conforme se acerca a la HAZ en donde alcanza el valor mínimo (52,1 Hv) en el lado de Advancing side.

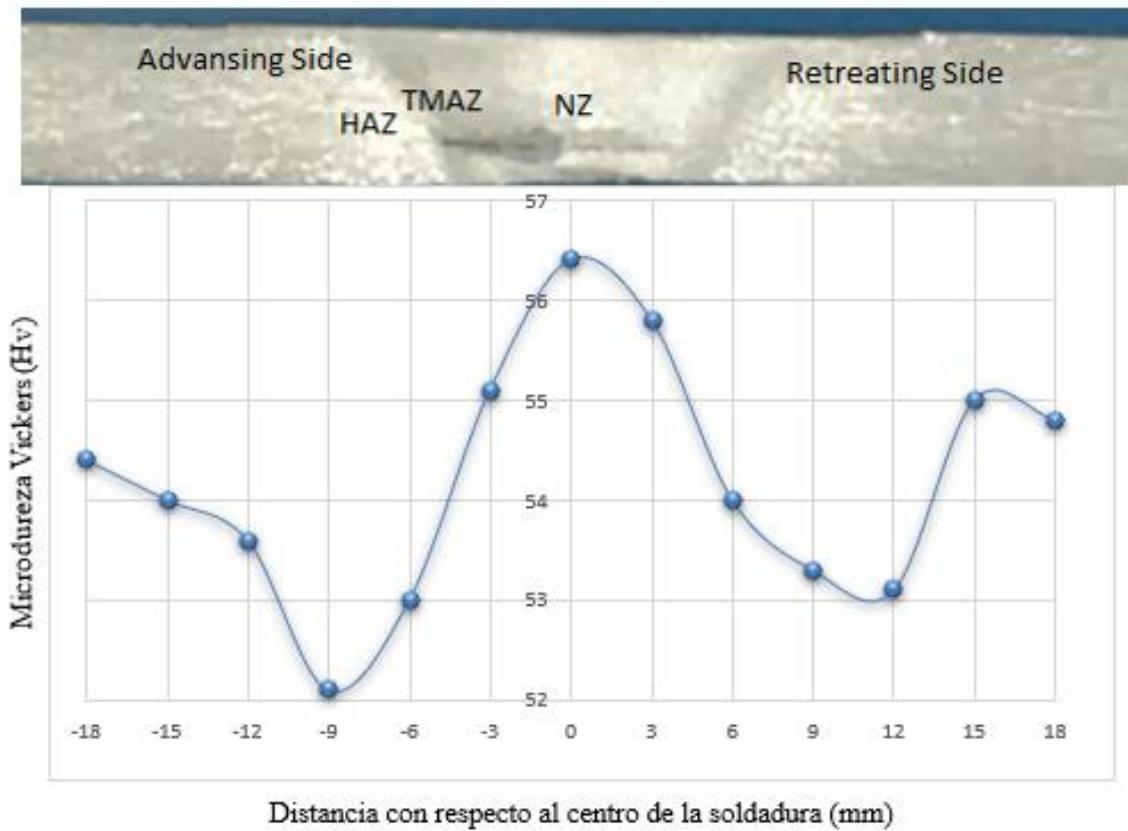
La causa más probable del aumento de la dureza en la “NZ” para ambos casos se debe a la deformación de precipitados gruesos a finos es decir la re precipitación de estos a lo largo de la soldadura como se observó en las micrografías descritas anteriormente, otro factor que contribuyó a este aumento de dureza fue la recristalización y, a su vez, refinamiento del grano que ocurrió en esta región. Como la dureza máxima se obtuvo en la “NZ”, la resistencia más alta estará concentrada en la misma lo que garantiza que el cordón de soldadura posiblemente no falle en esta región.

Sin embargo, esta formación de finos precipitados ocurre en la “NZ” y parcialmente en el “TMAZ” donde la temperatura generada es lo suficientemente alta para que estos se formen, es por esta razón que mientras más se aleja del centro de soldadura la dureza va disminuyendo, algo que se evidencia en los dos casos. El bajo valor de dureza obtenido en la “HAZ” para ambos casos responde a que los precipitados en esta región fueron ligeramente afectados por el calor manteniendo su tamaño grueso, esto provocó que resulten más perjudiciales para las aleaciones. Evidentemente si la dureza es menor en esta zona la resistencia de los dos materiales también.



**Gráfico 1-3:** Durezas obtenidas del material 1100

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.



**Gráfico 2-3:** Durezas obtenidas del material 6061

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

### 3.4.2 Ensayo de tracción

#### 3.4.2.1 Aluminio 1100

Según la Figura 5-3, la posición de la fractura se encontró en la “Heat affected zone” (HAZ) en el lado de avance que coincide con el valor mínimo de dureza en esta misma zona como se indica en el Gráfico 1-3, la flecha indica el sentido de avance de la soldadura. Las curvas de Esfuerzo vs Alargamiento de las 3 muestras de Aluminio 1100 se presentada en el Gráfico 3-3.



**Figura 5-3.** Probetas ensayadas de aleación de aluminio 1100

Realizado por: Rea, P., Vásconez, K., 2019.

La Resistencia a la tracción en la probeta 1 fue de 59,55 MPa, más alta que el metal base, por el contrario, la ductilidad fue menor a la del material base, y estos resultados están en concordancia con el perfil de dureza, Grafica 1-3, encontrado para esta probeta. Obteniendo como resultado final a una mayor dureza una mayor resistencia a tracción, pero una menor ductilidad.

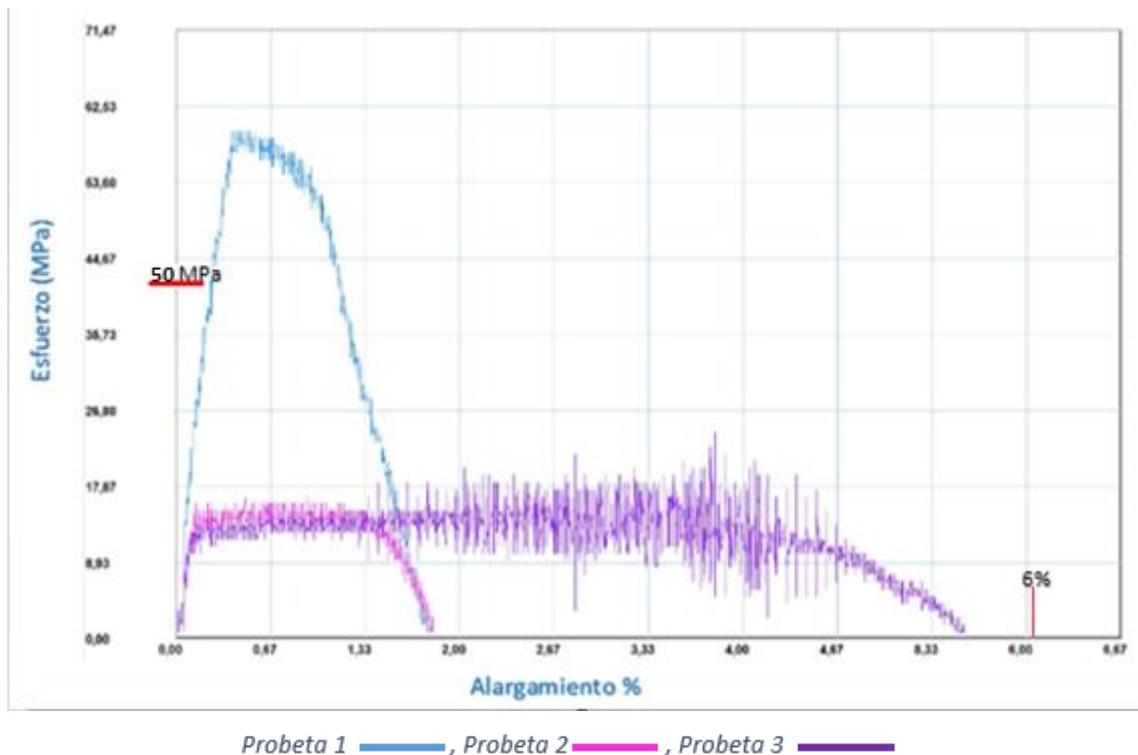
La Resistencia a la tracción en probeta 2 fue de 16,78 MPa inferior a la del metal base, se cree que este resultado se debe a que la muestra para la realización del ensayo fue extraída de la parte inicial de la longitud total soldada, en donde el proceso de FSW estaba empezando y el tiempo de permanencia de la herramienta no fue suficiente para que se alcance una temperatura adecuada para poder formar una dispersión fina de precipitados que finalmente contribuyan al aumento de dureza y consecuentemente al aumento de resistencia.

La Resistencia a la tracción en la probeta 3 fue de 24,22 MPa inferior a la del metal base, pero su ductilidad es la mejor y la más alta con respecto a las otras dos probetas, este resultado es coherente ya que si se tiene menor resistencia a tracción la ductilidad es mayor, físicamente esta

propiedad se observó en el tipo de fractura de la probeta 3, Figura 5-3, donde se produjo el típico cuello de botella antes de su falla.

Posiblemente en este caso se obtuvieron estos resultados debido a que la herramienta llega al final del proceso con un valor de temperatura alto lo que ocasiona que los precipitados se disuelvan, pero como la herramienta es retirada inmediatamente no existe el tiempo suficiente para que vuelvan los reagruparse y formarse en un tamaño más pequeño que permita obtener una alta resistencia y dureza. En el Anexo B se adjunta el informe entregado para corroborar la información.

Las líneas rojas del Gráfico 3-3 representan los valores de resistencia a tracción y elongación del material base.

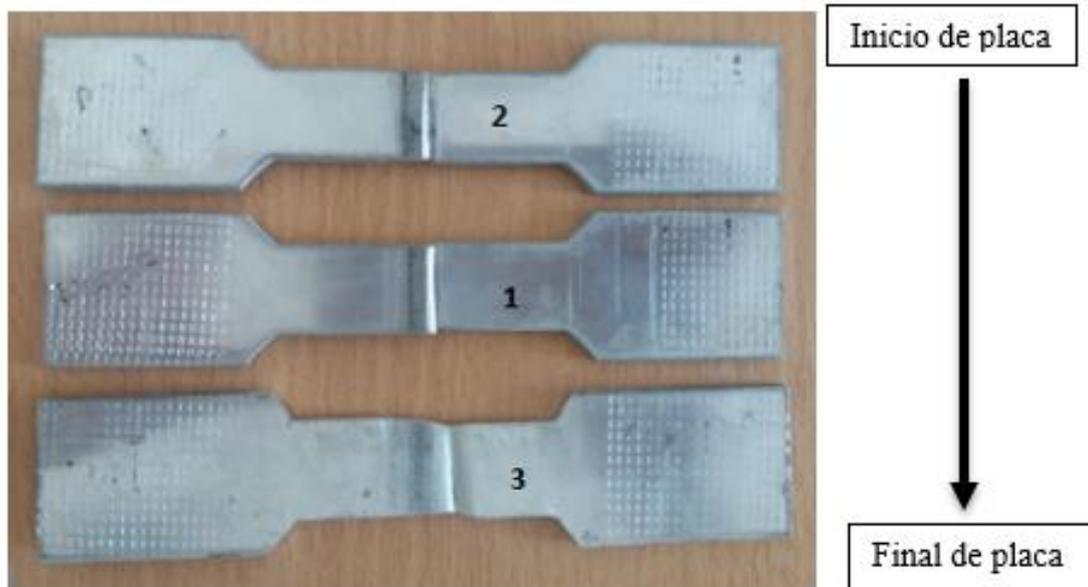


**Gráfico 3-3:** Curvas Tensión-Deformación para las probetas de aluminio 1100

Realizado por: Rea, P., Vásquez, K., 2019.

#### 3.4.2.2 Aluminio 6061

Según la Figura 6-3, la posición de la fractura se encontró en la “Heat affected zone” (HAZ) en el lado de avance que coincide con el valor mínimo de dureza en esta misma zona como se indica en la Gráfica 2-3, la flecha indica el sentido de avance de la soldadura. Las curvas de Esfuerzo vs Alargamiento de las 3 muestras de Aluminio 6061 se presentan en la Gráfica 4-3.



**Figura 6-3.** Probetas ensayadas de aleación de aluminio 6061

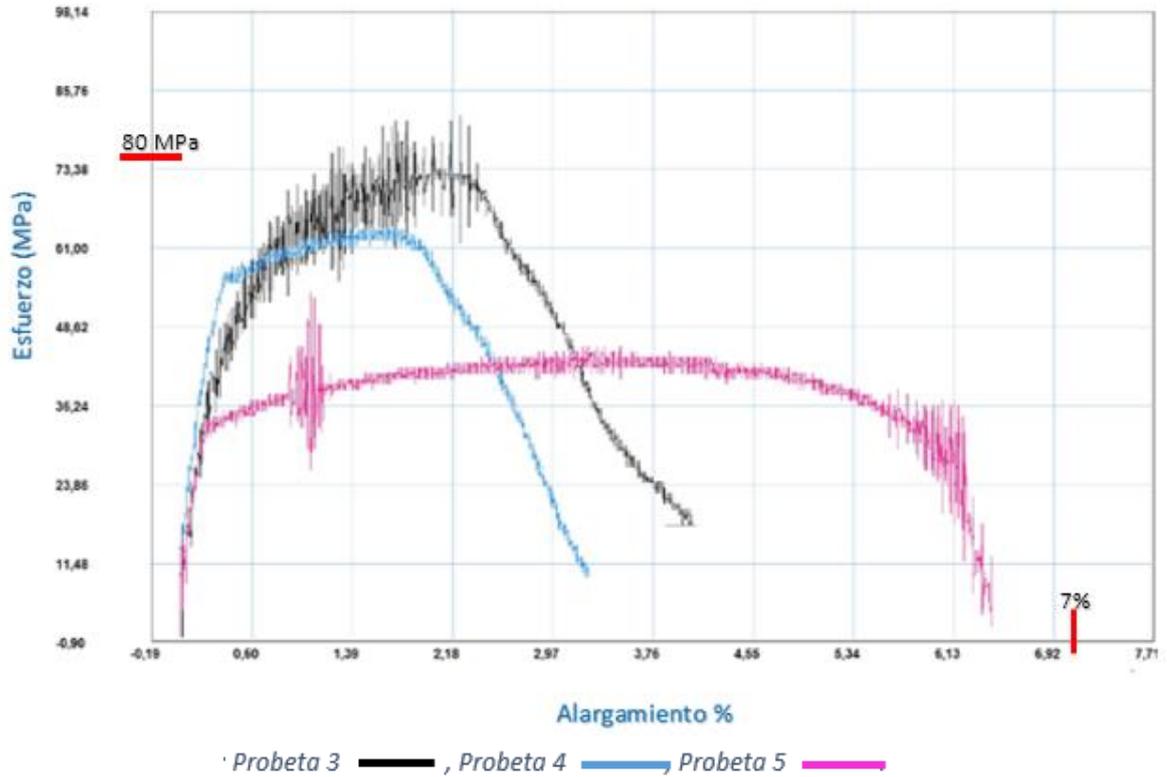
**Realizado por:** Rea, P., Vásquez, K., 2019.

La Resistencia a la tracción en la probeta 1 fue de 81,79 MPa, más alta que el metal base, por el contrario, la ductilidad fue menor a la del material base, y estos resultados están en concordancia con el perfil de dureza, Gráfica 2-3, encontrado para esta probeta. Obteniendo como resultado final a una mayor dureza una mayor resistencia a tracción, pero una menor ductilidad.

La Resistencia a la tracción en probeta 2 fue de 64,81 MPa inferior a la del metal base. La Resistencia a la tracción en la probeta 3 fue de 54,01 MPa inferior a la del metal base, pero con una buena ductilidad la más alta con respecto a las otras dos probetas. En caso de la probeta 2 y 3 caso también ocurrió el mismo fenómeno que en la aleación de Aluminio 1100, que anteriormente ya se explicó.

En la probeta 3, nuevamente se observó el tipo de fractura, Figura 6-3, caracterizada por el típico cuello de botella antes de su falla.

Las líneas rojas del Gráfico 4-3 representan los valores de resistencia a tracción y elongación del material base.



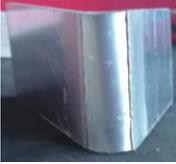
**Gráfico 4-3:** Curvas Tensión-Deformación para las probetas de aluminio 6061  
 Realizado por: Rea, P., Vásquez, K., 2019.

El fallo en la región HAZ está en concordancia con las literaturas (Zhang, et al., 2012) y (Madhusudhan, et al., 2009) en donde ocurre lo mismo.

### 3.4.3 Ensayo de doblado

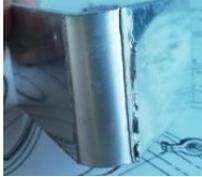
El ensayo de doblado en las dos muestras se realizó en la cara de la soldadura y de acuerdo a los criterios de aceptación y rechazo Anexo C de la norma AWS D1.2 (American Welding Society, 2013) las dos muestras pasaron la prueba de curvatura.

**Tabla 2-3:** Resultados de pruebas de doblado.

Probeta	Angulo de Doblez	Evidencia	Evaluación del ensayo
Aluminio 1100	180°		Conforme

Continua

Continua

Aluminio 6061	180 °		Conforme
---------------	-------	--	----------

**Realizado por:** Rea, P., Vásquez, K., 2019.

## CONCLUSIONES

La geometría de la herramienta cilíndrica plana seleccionada y adaptada a la fresadora CNC no produjo ningún tipo de discontinuidad en la junta de las placas de ambas aleaciones con espesor de 3mm, esto se validó con una inspección visual.

Durante el proceso de experimentación se evidenció que la velocidad de rotación era directamente proporcional a la velocidad de avance, ya que en la experimentación mientras se incrementaban los valores de dichos parámetros mejoraba significativamente el cordón de soldadura, finalmente se obtuvo el mejor cordón con los siguientes parámetros: 2500 rpm, 120mm/min para la aleación 1100 y 1900 rpm, 100mm/min para la aleación 6061.

Las velocidades de rotación y avance son inversamente proporcionales al espesor de placa ya que en la experimentación se empezó con valores de velocidades bajos según (Mishra, et al., 2014) que no ayudaron a la formación de un buen cordón debido a que estos correspondían a un mayor espesor de 6mm mientras que el experimentado en este trabajo fue de 3mm.

En los dos tipos de aleaciones soldadas por FSW se evidenció la formación de las diferentes zonas descritas por las referencias consultadas, el análisis macroscópico permitió distinguir cuatro tipos de zonas: Nugget Zone o Zona de mezcla, Thermomechanical affected Zone o Zona Termomecánicamente Afectada, Heat Affected Zone o Zona Afectada por el Calor, y el Metal Base, por último, se visualizó claramente el advancing side y el retreating side.

En el análisis microestructural de ambos tipos de aluminio se observó las evoluciones y cambios microestructurales en el tamaño de grano, así como la transformación de precipitados gruesos a finos, ya que en la NZ se encontró granos refinados y equiaxiales, mientras que los granos en la TMAZ tienen menor refinamiento que la NZ, en la HAZ el grano fue parecido al del Metal Base, en cuanto a los precipitados son más finos en la NZ y la TMAZ, mientras que en la HAZ mantienen el tamaño inicial, pero fueron afectados ligeramente por el calor.

La alta resistencia y dureza del cordón de soldadura se debió a la transformación de las partículas de precipitado grueso iniciales a más finos y a la recristalización dinámica que produjo granos más finos en la aleación 6061 y 1100. En la zona HAZ los precipitados no redujeron su tamaño, pero quedaron afectados por el calor de forma negativa, reduciendo la dureza en esta región, lo que provocó la rotura de las probetas en la aleación 1100 y aleación 6061.

En el ensayo de tracción las probetas fueron más propensas a la rotura en el advancing side debido a que en este lado ocurre la mayor fluencia del material al coincidir la dirección de la velocidad de rotación con la dirección de la velocidad de avance.

La probeta extraída del centro de la longitud total del cordón de soldadura de la placa fue con la que se obtuvo los valores máximos de resistencia que corresponden a 59,55 MPa para la aleación

1100 y 81,79 MPa para el aluminio 6061 estos valores fueron mayores a los del metal base, esto ocurrió debido a que esta región es más homogénea en cuanto a la variable temperatura.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda que el proceso se realice en una fresadora de control numérico, ya que esta posee altas velocidades de rotación, avance y permite controlar estos parámetros.

Seleccionar un sistema de sujeción que impida el movimiento de las placas que van a experimentar altas presiones por parte de la herramienta durante el proceso de soldado.

Si se retoma este tema de investigación haciendo uso de las mismas aleaciones, asegurarse que la composición química de las mismas sea la más aproximada a las presentadas en este trabajo.

Se recomienda para trabajos futuros un control de temperatura para mejorar los resultados en este proceso, en caso de que se sobrepase la temperatura de fusión de los materiales utilizar algún medio de lubricación.

Se recomienda continuar con la investigación ensayando un mayor número de probetas que permitan determinar con mayor exactitud los valores de resistencia a la tracción.

Si se continua con la investigación, realizar experimentaciones con materiales disimiles, con diferente tipo de junta, y con otro tipo de geometría en la herramienta.

## **GLOSARIO**

<b>ASTM</b>	American Society por Testing and Materials
<b>AWS</b>	American Welding Society
<b>CNC</b>	Control Numérico Computarizado
<b>FSW</b>	Friction Stir Welding
<b>HAZ</b>	Heat Affected Zone
<b>NZ</b>	Nugget Zone
<b>MB</b>	Material Base
<b>TMAZ</b>	Thermomechanical Affected Zone

## BIBLIOGRAFÍA

**ASM.** *Metal Handbook Atlas of Microstructure of Industrial Alloys.* vol. 7, 1972.

**ASM INTERNATIONAL.** *Aluminum and Aluminum Alloys* [blog] 2015. [Consulta: 12 de Octubre de 2019.]. Disponible en: <[https://www.asminternational.org/documents/10192/23555666/ASM+Subject+Guide\\_Aluminum.pdf/d8b67b75-1114-4279-b66e-fec86c62a880](https://www.asminternational.org/documents/10192/23555666/ASM+Subject+Guide_Aluminum.pdf/d8b67b75-1114-4279-b66e-fec86c62a880)>.

**ASTM E 384-05A** *Standard Test Method for Microindentation Hardness.*

**ASTM E3-11** *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.*

**AWS D1.2** *Structural Welding Code- Aluminum sexta edicion.*

**AWS D17.3** *Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Applications.*

**CAM, G.; & MISTIKOGLU, S.** “Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys”. *Journal of Materials Engineering and Performance* [en línea], 2014, 23 (6), pp. 1936-1953. [Consulta: 13 enero 2020]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-014-0968-x>

**CHANDRASEKHAR,; et al.** *Innovative design, analysis and development practices in aerospace and automotive engineering (i-dad 2018).* Springer Nature Singapore, 2019. pp. 56-57

**DESIGN MEDEEK.** *Aluminum design manual* [en línea]. 9ª ed. 2010. [Consulta el: 12 de Octubre de 2019.]. Disponible en: <<http://design.medeek.com/resources/truss/documents/Aluminum%20Design%20Manual%20010.pdf>>

**DUBOURG, L.; & DACHEUX, P.** "Design and properties of FSW tools". *Symposium of friction stir welding canada*, vol. 6, n°62 (2006),(Canada)

**D'URSO, G.; et al.** “The effect of process parameters and tool geometry on mechanical properties of friction stir welded aluminum butt joints”. [en línea], (Italia). [Consulta: 10 enero 2020].

Disponible en:  
[https://www.researchgate.net/profile/G\\_Maccarini/publication/225657723\\_The\\_effect\\_of\\_process\\_parameters\\_and\\_tool\\_geometry\\_on\\_mechanical\\_properties\\_of\\_Friction\\_Stir\\_Welded\\_aluminum\\_butt\\_joints/links/0912f50edcaf4c9f2a000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/G_Maccarini/publication/225657723_The_effect_of_process_parameters_and_tool_geometry_on_mechanical_properties_of_Friction_Stir_Welded_aluminum_butt_joints/links/0912f50edcaf4c9f2a000000.pdf)

**ELANGO VAN, K.; et al.** "Influences of tool pin profile and axial force on the formation". *Int J Adv Manuf Technol*, n°38 (2008), pp. 285–295.

**FERNANDEZ, G.; et al.** "Adaptación de una máquina herramienta para soldadura por fricción". *Congreso SAM/COMET*, 2009 (argentina).

**FUKUDA, T.** "Friction stir welding (FSW) process", *Welding International*, vol. 15, n°8(2001) pp. 611-615.

**GALÁN, Mariola.** Técnicas de Obtención de Grano Metalográfico en el rango milimétrico y centimétrico mediante diversos tratamientos térmicos y mecánicos. (Trabajo de titulación) (Pregrado) UNAM, México D. F. , Mexico,2007.

**JEFFUS, Larry. 2009.** "Soldadura Principios y Aplicaciones". 5ª ed. España-Madrid : Paraninfo, 2009, pp.5-6.

**KUTZ, Myer.** *Mechanical Engineers' Handbook: Materials and Mechanical Design*. 3ª ed.. Estados Unidos- New Yersey: John Wiley & Sons, Inc. 2015.pp. 60-64

**LIU, F.; & MA, Z.** "Influence of Tool Dimension and Welding Parameter on Microstructure and Mechanical Properties of Friction-Stir-Welded 6061-T651 Aluminum Alloy". *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, vol. 39A (2008), pp. 2378-2382.

**LOHWASSER, Daniela; & ZHAN, Chen.** *Friction Stir Welding From Basics to Applications*. 1ª ed. Estados Unidos- New York: Woodhead Publishing, 2009. pp.15-19

**LUMLEY, Roger.** Fundamentals of Aluminium Metallurgy Production, *Processing and Applications* 1ª ed. : Reino Unido: Woodhead Publishing, 2010.pp.46-47

**MADHUSUDHAN, G.; et al.** "Microstructure and mechanical property correlations". *Transactions of The Indian Institute of Metals*, n°1( 2009), Vol. 62, págs. 49-58.

**MARTINEZ, Elkin. 2015.** *Investigación de las modificaciones microestructurales y propiedades mecánicas en una aleación de aluminio aa6082-t6 soldada con la técnica de fricción-agitación (fsw)* . [En línea] (Trabajo de titulación). (Doctorado) Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2015 [Consulta: 02 de Noviembre de 2019]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/62161>

**MASTERBOND.** *Aluminio 1100-O*. [blog] [Consulta: 02 de Noviembre de 2019]. Disponible en: <http://www.matweb.com/search/GetReference.aspx?matid=8751>

**MEILINGER, Ákos.; & TÖRÖK, Imre.** "The importance of friction stir welding". *Production Processes and Systems*, vol. 6, nº1(2013), (Hungria).pp 25-34.

**MENDIETA MENDIETA, Royer Braulio; & MONTERO TACURI, David Humberto.** Análisis de la influencia de los parámetros de proceso en la sanidad interna y externa de juntas de aluminio 6061-T6 soldadas mediante el proceso fricción-agitación (FSW) [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado) Universidad Salesiana Sede Cuenca, Ecuador. 2019. pp. 121-126. [Consulta: 2019-09-15]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17540/1/UPS-CT008357.pdf>.

**MERDACI, Slimane; et al.** "Mechanical Traction Tests of Different Types of Materials". *International Journal of Engineering Research*, nº 3, (2019), vol. 5, pp. 59-65.

**MIANDI GROUP.** *How Aluminum can do for you?* . [blog] 2019. [Citado el: 20 de Octubre de 2019]. Disponible en: <https://www.aviationaluminum.com/application/>

**MISHRA, Rajiv; & MAHONEY, Murray.** *Friction Stir Welding and Processing*. Estados Unidos-Ohio: ASM International, 2007. pp. 201-204.

**MISHRA, Rajiv; et al.** *Friction Stir Welding and Processing*. Estados Unidos-Nueva York : Springer International Publishing, 2014. pp. 37-39

**MISHRA, R.; & MA, Z** "Friction stir welding and processing". *Materials Science and Engineering*, vol. 50, pp. 1-78.

**MAHONEY, M.; et al.** "Properties of Friction-Stir-Welded 7075 T651 Aluminum". *Metallurgical and materials transactions a*, (1998), vol. 29A, pp. 1955-1964.

**PEREZ ENRIQUEZ, Ramiro David.** Soldadura por Fricción-Revolución (FSW) en aleaciones de aluminio 7075 [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado) Universidad San Francisco de Quito, Ecuador. 2018. pp. 33-37. [Consulta: 2019-09-13]. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/7432/1/138718.pdf>

**PERSSON, Erik. 2011.** *Aluminum Alloys: Preparation, Properties and Applications*. Nova Science Publishers, 2011. pp.344-345

**THE ALUMINUM ASOCIATION.** *Aluminum Alloys 101*. [blog] 2019. [Citado el: 12 de Octubre de 2019]. Disponible en: <<https://www.aluminum.org/resources/industry-standards/aluminum-alloys-101>>

**THREADGILL, P; et al.** "Friction stir welding of aluminium alloys". *International Materials Reviews*, vol. 2, n°54 (2009), pp. 49–93.

**TOAPANTA BAUTISTA, Raúl Wladimir.** Estudio del proceso de soldadura por fricción agitación (FSW) y su incidencia sobre las propiedades mecánicas en uniones de perfiles de aluminio. [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado) Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica. Ambato- Ecuador. 2015.pp. 53-55 [Consulta: 2019-11-21]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/10026>.

**ULRICH, M.***Introduction to Structural Aluminium Desing* [en línea].Whittles Publising, 2010. [Consulta: 20 septiembre 2019]. Disponible en: [https://books.google.com.ec/books/about/Introduction\\_to\\_Structural\\_Aluminium\\_Des.html?id=Agc4bwAACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ec/books/about/Introduction_to_Structural_Aluminium_Des.html?id=Agc4bwAACAAJ&redir_esc=y)

**ZHANG, Y.; et al.** "Review of tools for friction stir welding and processing". *Canadian Metallurgical Quarterly*, n° 3(2012), (Canada), vol. 51, pp. 250-261.

**ZHANG, Z., XIAO, B. Y MA, Z.** "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical". *Springer*, n° 47 (2012), págs. 4075-4086.