



INSTITUTO SUPERIOR MINERO  
METALURGICO DE MOA  
DR. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ

Facultad: Metalurgia y Electromecánica

Departamento de Metalurgia - Química

## *Trabajo de Diploma*

En opción al Título de

# **Ingeniero Metalúrgico**

Comportamiento de la soldabilidad de dos placas de aluminio (AA 5456) mediante soldadura por fricción y agitación.

**Autor: Fausto Adérito Chipala Pedro**

Moa, 2019

“Año 61 de la Revolución”



INSTITUTO SUPERIOR MINERO  
METALURGICO DE MOA  
DR. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ

**Facultad: Metalurgia y Electromecánica**

**Departamento de Metalurgia - Química**

# *Trabajo de Diploma*

**En opción al Título de**

## **Ingeniero Metalúrgico**

**Comportamiento de la soldabilidad de dos placas de aluminio (AA 5456) mediante soldadura por fricción y agitación.**

**Autor: Fausto Adérito Chipala Pedro**

**Tutores: Ms.C. Marlo Leyva Tarafa**

**Ms.C. Lisandra Poll Legrá**

**Moa, 2019**

**“Año 61 de la Revolución”**



## Declaración de autoridad

Yo: Fausto Adérito Chipala Pedro

Autor de este trabajo de diploma, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido presentado para ningún grado de calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en el mismo documento.

A través de la presente declaración cedo mi derecho de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual con el cual, podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

-----  
Fausto Adérito Chipala Pedro

-----  
Ms. C. Marlon Leyva Tarafa

-----  
Ms.C. Lisandra Poll Legrá



## AGRADECIMIENTOS

*Primero que todo quiero agradecer a Dios por ser el prototipo de mi vida, por ser gran compañero y por estar siempre conmigo.*

*Pues, en estos momentos que puedo decir, que he cumplido una etapa de mi vida, debo dar gracias a mis padres Eugenia Sorte y Franco Pedro por haberes sido dos pilares importantísimos para lograr mis objetivos y estar siempre conmigo, a pesar de la distancia que nos separa, también le quiero agradecer a mi querida hija por haberme dado fuerza necesaria para lograr este triunfo.*

*Agradecer a mis tutores Marlon Leyva Tarafa y Lisandra Legra Poll por la ayuda, paciencia y apoyo brindado durante la realización de este trabajo de diploma.*

*Sería injusto no agradecer a mi novia Marinela de Fatima Gaspar Fundumuca, gracias por compartir conmigo tantos momentos, y por sus consejos, gracias por estar siempre a mi lado, gracias por ser parte importante de mi vida y por dejarme ser parte de la suya, porque de una u otra forma, el hecho de conocerla me dio gran apoyo y me está permitiendo finalizar esta etapa de mi vida.*

*Gracias a todas las personas que hicieron más grato estos años de universidad, ya que, a pesar de ser de distintos países, creamos lazos importantes con esperanza de nunca romperse.*

*Infinitas gracias a todos...*



---

## *DEDICATORIA*

*Dedico este trabajo de diploma a mis padres por haber sido siempre mis mejores guías en la vida, por haberme dado fuerzas y voluntad de seguir un camino seguro para ser lo que soy hoy y siempre una mejor persona.*

*Para todos los que me han guiado por el camino correcto y me han brindado su apoyo durante toda mi vida estudiantil, y a toda mi familia, a mis compañeros, profesores y amigos... muchas gracias.*



## *PENSAMIENTO*



*[...] batalla de ideas no significa solo principios, teoría, conocimientos, cultura, argumentos, réplica y contrarréplica, destruir mentiras y sembrar verdades; significa hechos y realizaciones concretas [...]*

*Fidel Castro Ruz*



## RESÚMEN

En el presente trabajo, se evaluó el comportamiento del efecto del proceso de soldadura, mediante el método de fricción y agitación en el aluminio AA 5456. También se determinaron las variaciones metalúrgicas, a través de placas de 120X60 mm de área sometidas a condiciones de velocidad de rozamiento de 1400 y 1600 (r/min), y presión de forja de 1,9 MPa. La microestructura obtenida presenta una red continua de precipitados del compuesto  $Mg_2Si$ ,  $Mg_2Al_3$  y  $FeMn$ , debido a las variaciones en la temperatura de forja de 225 a 330 °C, según el número de revoluciones, la velocidad de rotación y la presión aplicada en el área de trabajo. Las técnicas no destructivas utilizadas, permitieron afirmar que se logra obtener una buena unión soldada. Por último, se evaluó el impacto económico y ambiental del proceso de soldadura analizado.

Palabras clave: método de fricción y agitación, comportamiento, técnicas.



---

## SUMMARY

In this work, the effect of the welding process was established, for friction and stirring, in aluminum AA 5456, metallurgical variations were also determined, through plates of 120X60 mm area subjected to friction speed conditions of 1400 and 1600 (r / min), and forging pressure of 1.9 MPa, the microstructure obtained presents a continuous network of precipitates of the compound  $Mg_2Si$ ,  $Mg_2Al_3$  and  $FeMn$ , due to the variations in the forging temperature from 225 to 330 °C, according to the number of revolutions, the speed of rotation and the pressure applied in the work area. The non-destructive techniques used allowed to affirm that good union is achieved. Finally, the economic and environmental impact of the process was evaluated in detail.

**Keywords:** friction and agitation welding, characterization.



## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>2</b>
1.1    Introducción.....	5
1.2. Generalidades sobre el aluminio.....	5
1.3 Características del aluminio .....	6
1.3.1 Propiedades físicas del aluminio.....	6
<b>1.3.2. Propiedades químicas del aluminio .....</b>	<b>6</b>
1.3.3. Propiedades mecánicas .....	7
1.3.4. Aplicaciones del aluminio.....	7
1.3.5. Temperatura de recristalización .....	7
1.4. Etapas a considerar en el proceso de soldadura por fricción y agitación .....	8
1.5. Antecedentes investigativos .....	9
1.6. Proceso de soldadura por fricción y agitación .....	14
1.7.1. Ventajas de la soldadura por fricción y agitación.....	14
1.7.2 Desventajas de la soldadura por fricción y agitación .....	15
1.8. Etapas de la soldadura por fricción y agitación .....	15
1.9. Variaciones y descripción de la soldadura por fricción y agitación .....	15
1.9.1. Soldadura por fricción radial .....	15
1.9.2. Soldadura por fricción orbital.....	15
1.9.3. Soldadura por fricción lineal.....	16
1.9.4. Soldadura por fricción angular .....	16
1.9.5. Superficies de fricción orbital .....	16
1.10 Soldaduras convencionales del aluminio y sus aleaciones.....	16
1.11. Conclusiones del capítulo I.....	19
<b>CAPITULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
2.1. Introducción.....	21
2.2. Metodología para realización del proceso de soldadura por fricción y agitación.....	21
2.3. Caracterización del material base.....	22
2.3.1. Caracterización química del material base .....	22
2.3.2. Caracterización metalográfica del material base .....	22



2.3.3. Ensayos de microdureza.....	24
2.3.4. Ensayos de tracción.....	25
2.4. Preparación del proceso de soldadura .....	26
2.4.1. Fuente de energía del equipo .....	26
2.4.2. Preparación de las probetas para la unión .....	27
2.5. Evaluación de la soldadura .....	28
2.5.1 Inspección visual .....	29
2.5.2. Análisis químico del cordón de soldadura .....	29
2.5.3. Evaluación metalográfica de la junta soldada .....	29
2.5.3.1. Análisis Micrográfico.....	29
2.6. Cálculo de la fuerza axial necesaria para el calentamiento .....	30
2.7. Determinación del área de contacto o de soldadura .....	30
2.8. Obtención de la fuerza de contacto.....	31
2.9. Conclusiones del capítulo 2 .....	32
<b>CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>34</b>
3.1. Composición química de la aleación AA 5456 .....	34
3.2. Fases de la microestructura.....	35
3.3. Determinación de las temperaturas del proceso.....	36
3.3.2. Ensayo de tracción .....	37
3.3.3. Micrografía de la muestra de aluminio .....	38
3.3.4. Microdureza .....	41
3.4. Valoración económica .....	43
3.5. Valoración del impacto medio ambiental.....	45
3.5.1. Impacto ambiental que genera el ultrasonido .....	46
3.5.2. Impacto ambiental que generan líquidos penetrantes.....	46
3.6. Conclusiones del capítulo 3 .....	48
<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>49</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>50</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>51</b>





## **INTRODUCCIÓN**

Con las tendencias de incrementar la productividad industrial, se han venido implementando programas como los de reingeniería en todos los procesos, ciclos de calidad total, mantenimiento productivo total y otros tantos que han aparecido en la medida que los que se están utilizando muestran sus agotamientos y quedan obsoletos. Sea cual sea el caso, la mayoría de los programas cumplen o no con el objetivo de disminuir los costos de producción y mejorar la calidad de los productos; dicho en otras palabras, incrementan la productividad de los procesos y por consiguiente la de las empresas.

Pues, se trata de extender la vida útil y las prestaciones de los sistemas mecánicos que se encuentran al servicio del hombre, aumentar su eficiencia y mejorar su rendimiento. En la búsqueda por mejorar estas condiciones, tiene hoy en día mucha importancia la tecnología de los tratamientos superficiales y esto ha llevado a reconocer el valor del estudio de superficies y el entendimiento de los mecanismos que allí se generan, ya que de éstos se derivan la mayoría de las fallas que ocurren.

Cuando dos superficies planas se unen, la rugosidad superficial causa puntos de contacto discretos. La suma de las áreas de todos estos puntos constituye el área real de fricción y agitación o simplemente el área de contacto y para la mayoría de los materiales ésta será sólo una pequeña fracción del área aparente (nominal), la cual ocurriría si las superficies fueran perfectamente lisas. El área real donde contactan ambas superficies, es una función de la textura superficial, propiedades del material y las condiciones de carga.

Teniendo en cuenta la incorporación progresiva del aluminio dentro de la industria, gracias a su alta resistencia, ductilidad y bajo peso, entre otras propiedades. Parte de esta incorporación se debe al desarrollo de nuevas tecnologías de unión, principalmente la soldadura por fricción y agitación.



El aluminio y sus aleaciones son materiales que presentan ciertas características como: baja densidad, alta resistencia a la corrosión del medio ambiente, por tal motivo son excelentes materiales en la fabricación de equipos y componentes donde se requiere ahorro de peso, así como para la conformación y fundición de variadas piezas, en el cual los aceros al carbono y de baja aleación no tienen estas características, a pesar de su buen comportamiento mecánico. La soldadura por fricción a menudo puede ser la opción más adecuada para unir materiales con la misma composición molecular sin utilizar material de aporte, ya que al juntar dos piezas mediante la aplicación de presión se logra la interacción de moléculas de las mismas, entrelazándose entre sí, consiguiendo que la unión tenga casi las mismas propiedades del material original, es por ello que este tipo de soldadura es considerado como un método ideal para la unión de materiales.

El desarrollo del aluminio y sus procesos de soldadura va en aumento a consecuencia de la demanda actual de la industria del primer mundo, encontrándose una enorme variedad en sus aplicaciones, dentro de las cuales se pueden mencionar al automovilismo, construcciones estructurales y aeroespaciales, haciendo del aluminio y sus aleaciones un material versátil y flexible según sea su campo de acción. Sin embargo, estos avances e investigaciones no son manifestados en Cuba y generan desconocimiento en el momento de la operación del aluminio y sus aleaciones en uniones soldadas. Algunas de las aleaciones de aluminio, las más complejas, pueden alcanzar características mecánicas muy parecidas a la de algunos aceros. La adición de elementos de aleación, la deformación en frío y el tratamiento térmico hacen que su baja resistencia mecánica mejore significativamente.

Por lo que se plantea como: **Situación problemática:** Considerase el aluminio por tener buena soldabilidad a través de los procesos de soldadura por fusión fundamentalmente, e incluso al utilizar bajas velocidades de avance, el calor puede ser conducido más allá del arco, lo que requiere continuos ajustes de los parámetros de soldadura. Estos procesos de soldadura producen la formación de



óxidos, agrietamiento en caliente y porosidad, los cuales pueden engendrar defectos adversos sobre las propiedades mecánicas de las soldaduras.

Los procesos de soldadura en estado sólido, como el de soldadura por fricción y agitación, que es capaz de retener la integridad de las microestructuras del material y propiedades mecánicas, además permite que puedan ser más comparables a la matriz del material base, al ser más versátil, es más económico, ya que disminuye el uso de portadores energéticos altamente consumidores como las máquinas de soldar y menos afectaciones al medio ambiente por concepto de emisión de gases, formulando el siguiente: **problema:** No existen especificaciones concretas de las propiedades mecánicas y la metalurgia física, que se obtienen al realizar uniones de piezas mediante la soldadura por fricción y agitación de dos placas de aluminio AA 5456, que se puedan comparar con la matriz del material base.

### **Objeto de estudio**

La soldabilidad de dos placas de aluminio AA 5456 mediante soldadura por fricción y agitación.

### **Campo de acción**

Análisis microestructural, dureza y la zona de influencia térmica de la unión soldada.

### **Objetivo General**

Determinar el comportamiento de la soldabilidad de dos placas de aluminio AA 5456 mediante el proceso de soldadura por fricción y agitación.

### **Hipótesis**

Si se analiza el comportamiento microestructural, la dureza y la zona de influencia térmica de la unión soldada de dos placas de aluminio AA 5456, mediante el proceso de soldadura por fricción y agitación, teniendo en cuenta los parámetros que influyen en el proceso, tales como velocidad de rotación, temperatura de fusión y presión de forja, permitirá conocer si se obtiene una buena unión soldada.



## Objetivos Específicos

1. Establecer el procedimiento metodológico del proceso de soldadura por fricción y agitación.
2. Caracterizar la influencia de las variables tales como; velocidad de rotación, velocidad de penetración y tiempo de forja en el aluminio AA 5456.
3. Caracterizar la soldabilidad de la unión soldada de dos placas de aluminio tipo AA 5456, mediante técnicas analíticas.
4. Analizar las posibles variaciones microestructurales originadas en la zona de forja y en la zona de influencia térmica, así como la dureza resultante.

Las **tareas de la investigación** que ayudan a cumplir con los objetivos planteados son las siguientes:

1. Búsqueda y análisis de la información bibliográfica relacionada con las especificaciones técnicas, características o prestaciones para soldar la aleación de aluminio AA 5456.
2. Caracterización microestructural resultante en la junta o unión soldada.
3. Determinación de la resistencia de soldadura, mediante ensayos de microdureza.
4. Análisis de los parámetros para obtener una unión aceptable en la soldadura de las placas de pruebas.
5. Análisis económico y medioambiental del proceso de soldadura del aluminio AA5456 mediante fricción y agitación.



# **CAPÍTULO 1.**

## **MARCO TEÓRICO**



## **CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO**

### **1.1. Introducción**

La creación de centros y departamentos de investigación, constituye un parámetro que ha contribuido con éxito y crecimiento tecnológico en el ámbito mundial por el alto nivel competitivo y el interés de las empresas, encauzado a determinar las mejoras de los procesos de obtención de nuevos materiales y sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. En este capítulo se establece como objetivo primordial, realizar un análisis de las bibliografías existentes, relacionadas con el aluminio y sus aleaciones. Las propiedades físicas, químicas, mecánicas obtenidas durante el proceso de soldadura por fricción radial, los parámetros de soldadura por fricción-agitación y también el comportamiento micro estructural.

### **1.2. Generalidades sobre el aluminio**

El aluminio constituye uno de los cinco metales principales que superan el millón de toneladas de producción anual, es un metal centenario obtenido en laboratorio por primera vez en 1859, cuyo despegue en producción se inicia en Francia en 1889 con el procedimiento Heroult, cuyo fundamento sigue vigente (electrólisis de alúmina –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – disuelta en criolita –  $\text{F}_6\text{AlNa}_3$  – fundida), es hoy el segundo metal más consumido en el mundo; procede al cobre, cuya utilización, al igual que la del plomo (y la de otros metales como el Oro, situados por debajo de Hidrogeno en la serie electromotriz), se remonta a la prehistoria (José, y otros, 2000).

Después del oxígeno y del silicio, el aluminio es el elemento más abundante en la corteza terrestre (el 98% está constituida por los anteriores elementos, y por Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti en orden decreciente). Aproximadamente los 2/3 de las reservas de bauxitas ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), de alta calidad, se concentran en cuatro países: Australia 25%, Guinea 25%, Brasil 15% y Jamaica 6%. En 1990, el 30% de la alúmina primaria, procesada de la bauxita, fue producida por Australia; el 17% por USA, 8,5% Jamaica, 5% Brasil, 4% Venezuela, 15% Europa occidental y 19% por otros países (José, y otros, 2000).



En la década de los 90 los Estados Unidos de América continúa siendo el primer país productor del aluminio primario en el mundo occidental: 27,4% de la producción mundial. Seguido por Europa occidental 24,5%, Canadá 11,5%, Australia 8,6%, Brasil 7,3%, Venezuela 4,5%, otros 16,2% (José, y otros, 2000).

### 1.3. Características del aluminio

El aluminio es un metal que presenta múltiples propiedades muy apreciadas como son ligereza, notable dureza y resistencia, fácil mecanizado, excelente conductividad, así como un extraordinario aspecto decorativo, estas propiedades le han permitido ocupar un lugar destacado en las más modernas aplicaciones industriales.

#### 1.3.1. Propiedades físicas del aluminio

Según (Groover, 2007) y (Duponchelle, 1932), las propiedades físicas del aluminio son las que se muestran en la tabla 1.1, a continuación:

Tabla 1.1. Propiedades físicas del aluminio

Símbolo	Al
Número atómico	13
Peso atómico	26,98
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,69
Punto de fusión (°C)	650
Módulo de elasticidad (MPa)	70
Calor específico (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	917
Conductividad térmica (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	238
Resistividad eléctrica a 20 °C (μohm m)	2,67

#### 1.3.2. Propiedades químicas del aluminio

- ❖ Es un metal bastante activo.
- ❖ Reacciona con el oxígeno para formar óxido de aluminio
- ❖ Reacciona con muchos ácidos calientes.
- ❖ Reacciona con bases.



- ❖ Reacciona rápidamente con el agua caliente.
- ❖ Se prende fuego rápidamente cuando se lo expone a una llama.

### 1.3.3. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del aluminio, son propiedades físicas que describen el comportamiento de un material sólido al aplicarle fuerzas de tracción, compresión y torsión. Existen distintas propiedades mecánicas, ellas son: tenacidad, dureza, plasticidad, ductilidad, maleabilidad, elasticidad, entre otras.

Mecánicamente es un material blando (escala de Mohs: 2 - 3 - 4) y maleable. En estado puro tiene un límite de resistencia en tracción de 160 - 200 N/mm<sup>2</sup> (160 - 200 MPa). Todo ello le hace adecuado para la fabricación de cables eléctricos y láminas delgadas, pero no como elemento estructural. Para mejorar estas propiedades se alea con otros metales, lo que permite realizar sobre él operaciones de fundición y forja, así como la extrusión del material. También de esta forma se utiliza como soldadura. (Zander, y otros, 2008)

### 1.3.5. Temperatura de recristalización

La recristalización se caracteriza por una temperatura definida ( $T_{rec}$ ) como la menor temperatura de calentamiento en la que es posible la nucleación de nuevos granos.

La temperatura de recristalización de un metal constituye una cierta fracción de su temperatura de fusión ( $T_{mp}$ ) (S.L.Kakani, 2006).

### 1.3.4. Aplicaciones del aluminio

El aluminio es el metal más fácil de deformar, y por esta razón es muy apreciable. Se utiliza en distintos campos como fundición, laminación y forja, así como los procesos de conformación, unión tratamiento superficial adecuados a cada aplicación explica las múltiples aplicaciones de este metal alcanzando en la actualidad en la construcción de vehículos y aparatos de cirugía, contenedores criogénicos, motores de explosión, utensilios domésticos, así como en otras industrias.

$$T_{rec} = a * T_{mp} \dots \dots \dots 1.1$$

Ecuacion 1.1. Temperatura de recristalización. Fuente: (S.L.Kakani, 2006)



Donde:

a: coeficiente que depende de la pureza del metal y del grado de deformación plástica.

El valor de “a” se obtiene mediante las siguientes consideraciones:

- ❖ Para metales con alto porcentaje de pureza “a” = 0,3 – 0,4. La reducción de la concentración de las impurezas pueden disminuir el coeficiente a 0,1 – 0,2
- ❖ Para soluciones sólidas, “a” = 0,5 – 0,6 y puede alcanzar 0,7 – 0,8 en la disolución de metales de alto punto de fusión.

Para Al, Cu y Fe comercialmente puro, las temperaturas más bajas de recristalización son iguales a 220 °C, 470 °C y 550 °C respectivamente (S.L.Kakani, 2006).

Además, la temperatura de recristalización está relacionada con:

- ❖ Mayor cantidad de deformación previa, menor temperatura para iniciar la recristalización, debido a que habrá mayor distorsión y más energía interna disponible.
- ❖ Mayor tiempo de recocido disminuye el tiempo de recristalización (S.Avner).

#### 1.4. Etapas a considerar en el proceso de soldadura por fricción y agitación

Se trata de dos placas de aluminio que son sometidas al proceso de soldadura por fricción orbital que se realiza con el establecimiento de tres parámetros principales: velocidad, presión y acortamiento, tal como se muestra en la figura 1.2.

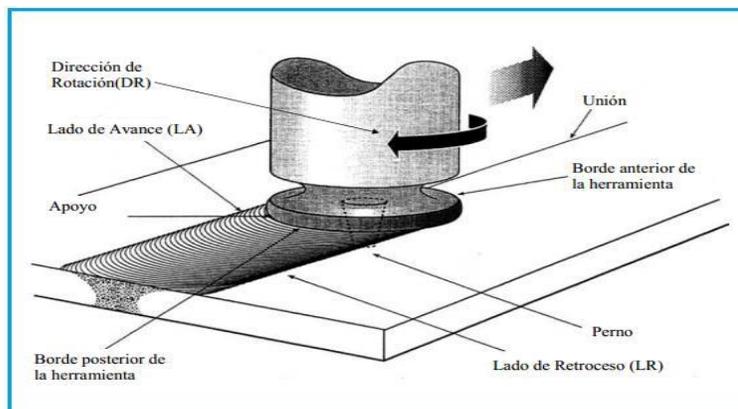


Figura 1.2. Proceso de soldadura por fricción y agitación (López, 2013).



### **1.5. Antecedentes investigativos**

La revisión bibliográfica se dirigió a la búsqueda de aspectos sumamente importantes, el primero está relacionado con el tema de investigación, con un enfoque teórico, metodológico y estructural, el segundo está relacionado con trabajos realizados sobre el tema desde el punto de vista teórico – práctico sobre el proceso de soldadura a nivel mundial.

Fue imprescindible la determinación de elementos que permitieron la identificación, caracterización, diagnóstico y análisis de los parámetros que inciden sobre el proceso, para analizar su influencia según la calidad requerida.

Un importante aporte lo constituyó el trabajo de (Romero, 2017), al establecer el proceso de soldadura por fricción radial o de torque de la aleación de aluminio AA 5754 con su fundamentación en los parámetros microestructurales y la dureza en la zona fundida y la zona de influencia térmica luego de realizada la unión, donde pudo determinar a través de los ensayos no destructivos (END), como el ultrasónico y el de líquidos penetrantes que es posible lograr una unión metalúrgica en la aleación AA 5754 mediante la soldadura rotativa, aunque se detectaron algunos defectos, desde el punto de vista tecnológico y que a su vez pueden ser controlados.

(González, 2013); realizó Estudio teórico de los procesos de soldadura en estado sólido y del proceso de soldadura por fricción. El mismo diseñó y construyó un mecanismo que permitiera un torno convencional, al desarrollar en forma controlada la experiencia de soldadura por fricción rotacional directa de barras de aceros SAE 1045, realizó las experiencias de soldadura por fricción a un conjunto de probetas cilíndricas de acero ,empleando el mecanismo construido para este fin, evaluó las propiedades mecánicas de las uniones soldadas obtenidas, analizó las juntas soldadas obtenidas, sin embargo concluyó que, al evaluar las propiedades mecánicas de las uniones soldadas realizadas, a través ensayos de tracción, se observa que una parte de las probetas soldadas tuvieron una resistencia inferior al límite de fluencia del material. Este comportamiento se observó principalmente en aquellas probetas soldadas a una velocidad de rotación de 2000 rev/min, debido a la elevada presión de calentamiento utilizada para esta velocidad al aplicar una



presión excesiva, el material en estado plástico producto del calor provocado por la fricción, es extruido hacia la superficie transformándose en rebaba o flash excesivo, y dejando el material en el centro de la unión frío y sin un contacto íntimo. Lo anterior puede ser corroborado con las observaciones metalográficas, que muestran la presencia de falta de fusión y acusan fisuras en la zona de unión, las cuales actúan como concentradores de esfuerzos limitando el esfuerzo de fluencia y la ductilidad en estas uniones.

El trabajo realizado por (Ramírez, 1999); propone el Estudio de la relación entre microestructura y propiedades mecánicas en piezas vaciadas en aluminio, se pudo establecer que en las aleaciones binarias particularmente aluminio – silicio, pertenecen a aquellos sistemas de aleaciones en los que una fase no metálica, que está presente cerca de una fase metálica en la microestructura, determina en gran manera las propiedades de una aleación. Por estos motivos (Ramírez, 1999); realiza una prueba de la compactación de los átomos de esa estructura metálica después de realizada la soldadura para que no se rompa fácilmente la pieza que se desea obtener.

(Arletis, 2017), contribuyó al tema abordando sobre el Comportamiento microestructural y la dureza, así como la temperatura de fricción y de forja en una unión de tubería disímil entre el AISI 1045 – AISI 316 L realizado por el proceso de soldadura por fricción rotativa o de torque, donde obtuvo como resultados que, en las microestructuras de la ZTMA de la soldadura disímil AISI 1045 – AISI 316 L, para 900 rev/min está compuesta por estructura ferrita perlita con fases presentes de ferrita dendrítica y austenita en el acero AISI 1045 y de estructura del tipo ferrita dendrítica, ferrita lathy y austenita, en el AISI 316 L, que lo caracteriza como una solidificación ferrita – austenita (FA). Se determinó en la ZTMA para 800 rev/min que en las estructuras existe la presencia de ferrita con la formación de austenita dendrítica y austenita en los límites de grano de la ferrita, en el AISI 1045 y fase austenítica, con una franja de ferrita en el AISI 316 L, con el mismo tipo de solidificación, quedó establecido que durante la unión de tubería con diámetro de 25 milímetros entre el AISI 1045 – AISI 316 L, se requiere de una temperatura de



fricción desde 770 hasta 738 °C y temperatura de forja desde 743 hasta 731 °C, donde en correspondencia con estas temperaturas, la dureza fluctúa entre 250 y 236,5 HV, según los números de revoluciones empleados.

(Ocaña, 2017) estableció el comportamiento superplástico de la aleación de titanio Ti - 6 Al - 4 V del tipo  $\alpha + \beta$  sometida a soldadura por fricción rotativa, concluyó que, los parámetros de soldadura calculados permiten establecer que es posible realizar la unión de la aleación de titanio Ti - 6Al - 4V bajo estas condiciones, pero precisando que para menor número de revoluciones se obtiene una unión de la aleación de titanio Ti - 6Al - 4V bajo estas condiciones, pero precisando que para menor número de revoluciones se obtiene una unión metalúrgica con mejores propiedades mecánicas, en el mismo quedaron establecidas las características metalúrgicas de la aleación de titanio, donde se determinó que los granos tienden a mantener diferentes comportamientos en correspondencia con las zonas analizadas, la zona termomecánicamente afectada y la zona afectada térmicamente, los cambios en las microestructuras y la morfología están asociados a la acción de los parámetros de soldadura empleados, donde la velocidad de soldadura, la temperatura de forja y de fricción provocan la interacción entre los materiales y provocan la unión.

(Peel, y otros, 2006), evaluaron el efecto de las velocidades de avance y de rotación de la pieza en los esfuerzos residuales de juntas disímiles AA 5083 y AA 6082, mediante las técnicas de difracción de rayos X y difracción de neutrones. Los mayores esfuerzos residuales reportados en este trabajo se presentaron en sentido longitudinal, en la zona que coincide con el ancho de la zona de esfuerzos a tracción fue proporcional a la velocidad de rotación empleada, es decir, zonas más amplias de esfuerzos a tracción se presentaron al emplear mayores velocidades de rotación; por lo anterior se consideró ésta como la variable dominante del proceso y la que se recomienda modificar para alterar el estado de esfuerzos en una junta unida mediante soldadura por fricción.

(Méndez, 2011), efectuó la investigación sobre el efecto de la velocidad de rotación en la calidad de la unión de la soldadura por fricción y agitación en una aleación de



Aluminio AA 6063, estableció que las uniones realizadas a 2 000 r/min presentaron mayor material deformado y mayor número de granos de pequeño tamaño en la zona de la unión debido a la posible recristalización, mientras que la zona termomecánicamente afectada (ZATM), presentó una ligera tendencia a aumentar el tamaño y la cantidad de precipitados en comparación a las demás uniones realizadas a velocidades de 1 400 y 1 000 rev/min.

(Woo, y otros, 2011) expone la importancia del tamaño de grano en la fractura de las aleaciones superplásticas comerciales de titanio Ti - 6Al - 4V y aluminio 7475. Ellos estudiaron el crecimiento de cavidades durante la deformación superplástica y concluyeron que la elongación total es aproximadamente una función lineal de la inversa del tamaño de grano de los materiales superplásticos. El modelo entregado en ese estudio se basó en una teoría el deslizamiento de los bordes de grano y una teoría de crecimiento de cavidades.

(Díaz, 2011), determinó el comportamiento mecánico en condiciones dinámicas o de fatiga, de uniones soldadas de la aleación de magnesio AZ31B, por el proceso soldadura de fricción-agitación (SFA) comparado con el GTAW, llegado a la conclusión con relación al objetivo principal de esta investigación, cabe mencionar que el comportamiento a fatiga del material base de la aleación de magnesio AZ31B fue mayor que el presentado por las uniones soldadas por SFA y GTAW. El comportamiento a fatiga de las uniones soldadas por SFA fue superior al hallado por las uniones GTAW debido a la menor presencia de defectos. Basados en los datos experimentales obtenidos, la reducción de la resistencia a la fatiga para las uniones soldadas por SFA con referencia al material base evaluada en  $2 \times 10^6$  ciclos, es del ~30 %, y del ~40 % para las uniones soldadas por GTAW. Resultados similares fueron reportados por Padmanaban.

(Rodríguez, 2015), propone el estudio sobre aleaciones de aluminio de las series AA 2218, AA 5050 y AA 6082 empleadas para la fabricación de casquillos de eslingas de cable de acero, y concluyó que, Las microestructuras obtenidas en cada una de las aleaciones y caracterizadas por el tamaño del grano y su morfología de una orientación de las fase alfa en la aleación Al- Mg, estructura dendrítica con silicio



eutéctico muy fino en la aleación Al – Si – Cu y estructura poliédricas o acciculares para la aleación Al – Si – Mg, permiten establecer que la aleación de Al – Mg presenta mejor propiedades para ser sometida a proceso de compresión sin provocar efecto de agrietamiento en ella.

(Bedoya, 2011), realizó un trabajo intitulado, Estudio metalúrgico de las uniones soldadas por fricción-agitación de la aleación de aluminio AA 6261-T5, concluyó que, las transformaciones microestructurales ocurridos durante la SFA y las propiedades mecánicas resultantes en las juntas soldadas de la aleación de aluminio AA 6261-T5, dependen esencialmente del aporte de calor sobre la junta y de la excesiva deformación plástica a altas velocidades que promueve la recristalización dinámica sobre la ZA de la junta y que, el aumento de la velocidad de rotación, que genera una mejor capacidad de flujo plástico por efecto de la rotación del pin, y el aumento de la velocidad de soldadura, que produce un menor aporte de calor por unidad de longitud tienen una relación directamente proporcional con la resistencia mecánica de la junta, para el rango de las condiciones estudiadas.

(Daza, y otros, 2018), desarrolló un trabajo que se titulaba, Caracterizar mecánicamente y microestructuralmente uniones soldadas de aluminio serie 6061 mediante el método de soldadura por fricción-agitación (FSW), evaluando las propiedades en la unión, donde concluyó que, La unión de placas de Aluminio 6061 mediante el método de soldadura por fricción y agitación se logró de manera exitosa para las diferentes combinaciones de las variables, excepto en aquellas donde la velocidad de rotación del husillo era 250 rev/min y avances de 300 y 165 mm/min, debido a que la poca fricción no generaba un aporte térmico suficiente para permitir un estado plástico que facilitara la coalescencia de la unión, por otro lado se evidencio que la herramienta generó un desbaste en la unión a tope, y en las micrografías obtenidas en cada combinación es evidente que existe un cambio en el tamaño de grano siendo grueso en el metal base y fino en la zona soldada. El tamaño de grano fino se da ya que el efecto de la fricción y la agitación entre las placas y la herramienta genera un aumento de temperatura por debajo del punto de fusión del aluminio, por lo que el material entra a un estado de plasticidad,



produciendo recristalización en esta zona.

### **1.6. Proceso de soldadura por fricción y agitación**

La soldadura por fricción y agitación es un proceso de unión de dos materiales similares o disímiles, ideado por The Welding Institute (TWI) a comienzos de los años 90 y patentado en 1991, demostrando tener un gran potencial para la realización de uniones de cualquier tipo de aleación y en especial de aleaciones no ferrosas de bajo punto de fusión, donde las aleaciones de aluminio ocupan un lugar de privilegio (Revista Materia ISSN, 2003). A una temperatura de fusión baja y para aleaciones mixtas. La soldadura por fricción y agitación permite unir incluso materiales que son difíciles de soldar o materiales de diversos tipos como aluminio, magnesio, cobre, titanio, o acero.

Según (Pedro, y otros, 2003), afirman que es posible consolidar o lograr la unión de materiales circundante, a partir de la presión generada por una herramienta cilíndrica la que es esencial y forja. A este proceso se le llama soldadura por fricción-agitación.

La zona de unión entre los materiales se caracteriza por una estrecha zona afectada por el calor, la presencia del material deformado plásticamente alrededor de la soldadura y la ausencia de una zona de fusión.

#### **1.7.1. Ventajas de la soldadura por fricción y agitación**

- ❖ No es necesario el aporte de otro metal,
- ❖ No hay defectos de porosidad y solidificación,
- ❖ Es un proceso limpio ya que no se libera humo, chispas y escorias,
- ❖ La limpieza de la superficie no es tan crítica en comparación con otros procesos de soldadura,
- ❖ El calor afecta apenas una pequeña parte,
- ❖ Se estima que los tiempos de soldadura son mínimos,
- ❖ La mayoría de los materiales de ingeniería y sus diferentes combinaciones son adecuadas para unirse,
- ❖ El proceso es fácilmente automatizado para la producción,



- ❖ No requiere que el operador tenga necesariamente un título de soldador.

### **1.7.2 Desventajas de la soldadura por fricción y agitación**

- ❖ La pieza debe tener un eje de simetría y ser capaz de girar alrededor de su eje,
- ❖ La alineación de las piezas de trabajo tiene que ser la adecuada para alcanzar un calor uniforme,
- ❖ La preparación de la geometría de la interfaz puede ser crítica para lograr un equilibrio térmico adecuado,
- ❖ Los costos del equipo y herramienta son altos en bajos volúmenes de producción.

### **1.8. Etapas de la soldadura por fricción y agitación**

La soldadura por fricción y agitación se desarrolla en dos etapas conocidas como: etapa de fricción y etapa de forjado.

El calor para la soldadura se desarrolla durante la etapa de la fricción, y la soldadura normalmente se consolida con la forja o la etapa de pérdida de longitud axial.

### **1.9. Variaciones y descripción de la soldadura por fricción y agitación**

#### **1.9.1. Soldadura por fricción radial**

El movimiento radial se puede utilizar para soldar collares y secciones circulares (no conviene girar las partes a unir). La fuerza aplicada sobre la banda giratoria es perpendicular al eje de rotación. El collar gira y se comprime a medida que se genera el calor (Paul, y otros, 2018).

#### **1.9.2. Soldadura por fricción orbital**

La pieza de trabajo no gira alrededor de su eje y en consecuencia, las piezas de trabajo no deben ser necesariamente circulares o tubulares. Este proceso con movimiento orbital es una opción cuando es necesario una orientación angular entre elementos (Paul, y otros, 2018).



### **1.9.3. Soldadura por fricción lineal**

Consiste en rozar un componente sobre la superficie del otro al utilizar un movimiento lineal oscilatorio. El movimiento se produce normalmente utilizando distancia de recorrido del orden de 1 - 3 (mm) y por consiguiente se genera un estado plástico en un cierto volumen de material (flash), que es desplazado hacia la periferia del material (Paul, y otros, 2018).

### **1.9.4. Soldadura por fricción angular**

Emplea un movimiento de rotación reversible cíclico en el cual, una o ambas piezas en movimiento giran a través de un ángulo dado que es menor que una rotación completa (Paul, y otros, 2018).

### **1.9.5. Superficies de fricción orbital**

Se consigue por el movimiento de rotación de una pieza de trabajo consumible a medida que recoge a través de la superficie de otra pieza de trabajo.

La pieza de trabajo se encuentra perpendicular al eje de rotación de la pieza consumible (Paul, y otros, 2018).

## **1.10 Soldaduras convencionales del aluminio y sus aleaciones**

Los primeros intentos de soldar aluminio con aleaciones y fundentes que sirven para la soldadura de aceros y aleaciones de cobre, fracasaron. Este metal y sus aleaciones no se mojaban por las aleaciones apropiadas para soldar aceros y aleaciones de cobre.

Más de dos décadas el aluminio fue considerado como un metal que se suelda con gran dificultad o incluso no soldable. La causa de eso residía ante todo en una alta resistencia química de su óxido  $Al_2O_3$ .

La película de óxidos que se forma al aire 20 °C, se compone de dos capas. La capa interior adyacente al metal (la de barrera) es compacta con una red cristalina no terminada, es decir amorfa que puede transformarse en la modificación cristalina después de una permanencia larga al aire, o al mantenerla a la temperatura menor



que 200 °C durante dos horas. La capa exterior denominada película de óxido y aire, se compone de un óxido poroso, más penetrable, su espesor depende del tiempo que dura la reacción y de la humedad que tiene la atmósfera circundante.

Una breve permanencia a temperaturas aproximadas a 500 °C, conducen a la formación de óxido amorfo. Al mantener a temperaturas hasta 475 °C durante 10 o 12 horas o después de permanecer a la temperatura de 500 °C durante 2 o 4 horas, se observa una transformación parcial del óxido al estado cristalino. Una oxidación prolongada a temperatura superior a 475 °C conduce a la transformación total al estado cristalino.

Enaltece que, en el curso preparatorio para soldar la superficie de aluminio, se somete a la activación mediante el decapado químico de la película de óxidos en ácidos o álcalis. Los productos de la interacción entre el decapante, la película y el aluminio se eliminan de la superficie de este último mediante un lavado en aguas caliente y fría y el calentamiento en un armario secador a la temperatura de 80 a 100 °C. (Lashkó, y otros, 1979).

Según el manual de soldadura para ingenieros (Ignoto, 2001) se dice que un material es soldable en un grado prefijado, si se logra la continuidad metalúrgica de la unión a través de un procedimiento determinado y para una aplicación específica, de manera que dicha unión cumpla con las exigencias prescritas con respecto a sus propiedades locales y a su influencia en la construcción de la cual forma parte integrante.

Como lo indican (Dallam, y otros, 1993) las soldaduras pueden ser caracterizadas de acuerdo con diversos criterios, entre los que están: el proceso de soldadura utilizado, altura, forma, propiedades mecánicas, composición química.

Los métodos apropiados de caracterización dependen de la función de soldadura y el grupo de propiedades particulares requeridas para la aplicación.



---

En el caso específico del aluminio, así como sus propiedades, lo hacen acreedor del primer lugar en la selección de materiales para ciertas aplicaciones, también se dificulta, pero no imposibilitan el proceso de soldadura.

Esta dificultad, como lo indican Dickerson e Irving (1992) depende del grupo de aleación de aluminio a la cual se refiera. El aluminio, como sus aleaciones, posee una fuerte afinidad química por el oxígeno, por lo que desarrolla rápidamente una película de óxido refractario y tenaz cuando se exponen al aire, conocidas como alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).



### **1.11. Conclusiones del capítulo I**

- ❖ En la búsqueda bibliográfica se pudo establecer que el proceso de soldadura por fricción y agitación, permite unir en el estado sólido el aluminio y sus aleaciones, donde la formación de defectos durante el proceso, puede estar limitado por la formación de estructuras frágiles sobre todo cuando se trata del proceso de soldadura por arco eléctrico.
- ❖ Se pudo constatar que durante el proceso de Soldadura por fricción y agitación, se producen en el material variaciones microestructurales en la zona afectada por el calor (ZAC) y en la zona termomecánicamente afectada (ZATM), asociada al proceso de fricción y agitación, así como la de forja.
- ❖ La soldadura por fricción y agitación es un proceso de unión, donde se combinan los parámetros velocidad de rotación, desplazamiento, tiempo, temperatura y fuerza para obtener dicha unión de las diversas aleaciones sin emplear ningún material de aporte.



---

## **CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS**



## **CAPITULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Introducción**

La obtención o fabricación de materiales para soldadura es un proceso físico-químico complejo. En la formación de las propiedades del material influyen diversos factores y parámetros tales como: composición química, concentraciones, temperatura y velocidad de enfriamiento. El estudio de la metalurgia del metal de soldadura generalmente se restringe a la zona totalmente fundida, sin distinguir entre las regiones mezcladas y no mezcladas y excluyendo a la zona parcialmente fundida.

### **2.2. Metodología para realización del proceso de soldadura por fricción y agitación.**

El desarrollo experimental de este trabajo se encuentra resumido en el diagrama de flujo enlustrado en la figura 2.1. En esta metodología se distinguen en dos etapas fundamentales, siendo la primera caracterización del material base y la caracterización del proceso de soldadura por fricción y agitación, realizada mediante los ensayos destructivos.

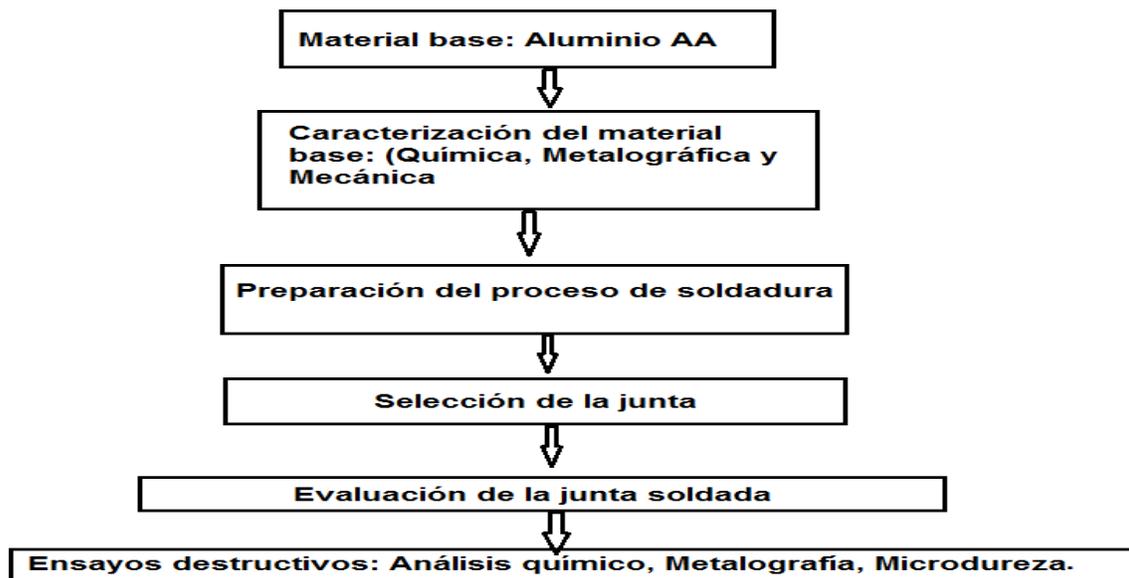


Figura 2.1. Metodología para realización del proceso de soldadura por fricción y agitación.



### **2.3. Caracterización del material base**

Los materiales base utilizados en la realización de este trabajo, fueron dos placas de aluminio AA 5456, ambas de 4 mm de espesor, rectangular con un área de 120x60 mm, maquinada en una fresadora para darle la forma plana, las cuales fueron unidas mediante el proceso de soldadura por fricción y agitación.

La evaluación de los materiales estuvo comprendida inicialmente por la caracterización química, seguida por la caracterización metalográfica. Finalmente, se determinaron las principales propiedades mecánicas del material base a través de la caracterización mecánica, mediante ensayos de microdureza y de tracción.

#### **2.3.1. Caracterización química del material base**

La caracterización química del material base consistió en la determinación del porcentaje en peso de los elementos aleantes contenidos en el material base (AA 5456). Se extrajeron muestra de 7 gramos del mismo material, y por medio del método analítico de espectroscopia de masa cuántica, se determinó la cantidad de cada elemento existente en la estructura.

Los elementos que se adicionan a las aleaciones de aluminio en pequeños porcentajes son el B, Cr, Ti, V y Zr, los cuales tienen un efecto sobre el refinamiento de grano, por las características de formar compuestos intermetálicos de elevado punto de fusión.

#### **2.3.2. Caracterización metalográfica del material base**

La estructura del material base fue analizada microscópicamente por medio de un estudio metalográfico, por eso se tomó una muestra de aluminio usando una cortadora de disco refrigerada, la cual se aplicó después del procedimiento de preparación de la muestra, realizando un lijado con papel de lija de carburo de silicio: 240, 1200 y lijas de paño. Una vez obtenida una superficie regular por medio del desbaste, se procedió con el pulido fino y final a las probetas de estudio, utilizando una maquina pulidora con un paño y alumina de 0,05 micras hasta obtener el espécimen en espejo.



Después de obtener espécimen libre de rayas, el material fue atacado con un reactivo específico (hidróxido de amonio), para evaluar su microestructura; dichos reactivos se seleccionarán de acuerdo a la norma ASTM E- 407. La probeta del aluminio estructural se atacó con una solución amoniaca, al 2% durante 10 segundos.

Posteriormente las micrografías fueron observadas y fotografiadas a aumentos desde 100x a 400x, a través de un microscopio óptico WF 10X/22, mostrado en la figura 2.2.



Figura 2.2. Microscopio óptico WF 10X/22.

La figura 2.3, muestra la microestructura del aluminio AA 5456, la cual presenta granos pequeños y una red continua de partículas finas del compuesto intermetálico  $Mg_2Al_3$  llamada fase  $\beta$  en los límites de grano. Se observan granos equiaxiales de aluminio, predominantemente. Ocurre la precipitación en el interior de los granos. En los límites de granos se llegan a formar largos precipitados de  $Mg_2Si$  y partículas de  $FeMn$ .



Figura 2.3. Microestructura de la aleación de aluminio AA 5456.

### 2.3.3. Ensayos de microdureza

El ensayo se realiza mediante la norma ASTM E-384 (Standard test method for microindentation hardness of materials), cuyos parámetros son: microindentación con una carga de 25 a 1000 gf, aplicación de la carga de 2 a 15 segundos, con una tolerancia de más menos 2 segundos, dependiendo del material y la dificultad que presente la visualización de la huella dejada en la superficie de estudio.

La dureza del aluminio se obtiene realizando huellas de indentación a lo largo del eje axial del material por medio de microdurómetro de marca CARMANO, figura 2.4 se analiza las huellas por medio de un software kameram.



Figura 2.4. Microdurómetro CARMANO.



#### 2.3.4. Ensayos de tracción.

La caracterización mecánica del material base se complementó con la realización del ensayo de tracción la cual fue realizada según la norma ASTM E3-11 (2017) Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.

Para el ensayo de tracción de las probetas en las diferentes juntas soldadas se utiliza la maquina convencional computarizada Tinius Olsen SUPER L-120 localizada en el laboratorio de análisis de esfuerzos y vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica, tal como se muestra en la figura 2.6

El ensayo de tracción fue realizado en la junta soldada, como en el material base, determinándose las propiedades mecánicas de resistencia máxima, porcentaje de elongación en 0,17 mm, correspondiente a 0,0067 pulgadas y 0,0017 % de deformación.

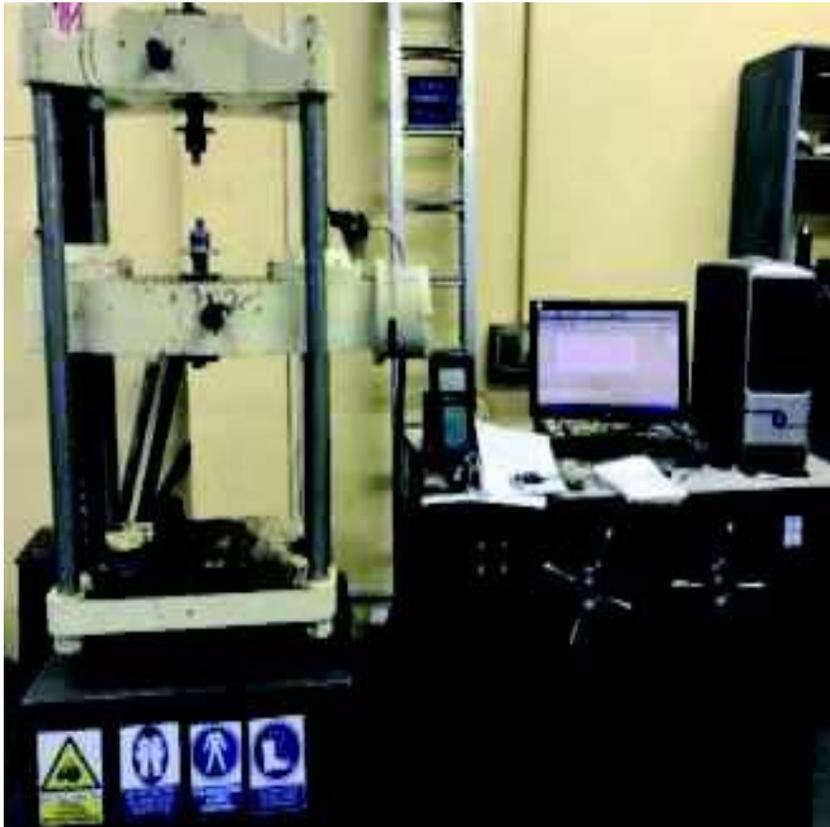


Figura 2.6. Máquina universal de ensayos de tracción computarizada.



## 2.4. Preparación del proceso de soldadura

### 2.4.1. Fuente de energía del equipo

El equipo de soldadura utilizado en este trabajo, fue una fresadora que se encuentra en el taller de maquinado de la empresa EMNi, como se muestra en la figura 2.7, de corriente continua.



Figura 2.7. Fresadora utilizada en el proceso de soldadura por fricción y agitación.

Los datos técnicos del equipo se resumen en la tabla 2.2, mostrada a continuación

Tabla 2.2. Datos técnicos de la fresadora utilizada en el proceso de soldadura.

Voltaje	220, 380, o 440 V (trifásica)
Tensión en vacío	64 V
Corriente	Continua (constante o pulsada)
Corriente nominal	300 A
Corriente máxima	450 A
Peso	1000 kg
Potencia máxima consumida	7,5 kW



#### 2.4.2. Preparación de las probetas para la unión

Se utilizaron dos placas del material base y fueron cortadas en 120x60 mm, como se muestra en la figura 2.8, con la finalidad de facilitar su manipulación durante los ensayos realizados en la unión metálica. Se limpiaron las probetas con un cepillo metálico, lijado y finalmente con un paño impregnado con solvente, eliminando de este modo, suciedad, grasa o cualquier partícula en la superficie que pudieran generar defectos.



Figura 2.8. Material base utilizado para la unión.

Posteriormente se realizó la unión entre las placas de aluminio AA 5456, a partir de la soldadura seleccionada. Después se cortó en tiras pequeñas para la fabricación de las probetas que fueran empleadas en la caracterización destructiva de la soldadura (ensayos de tracción), según la figura 2.9.

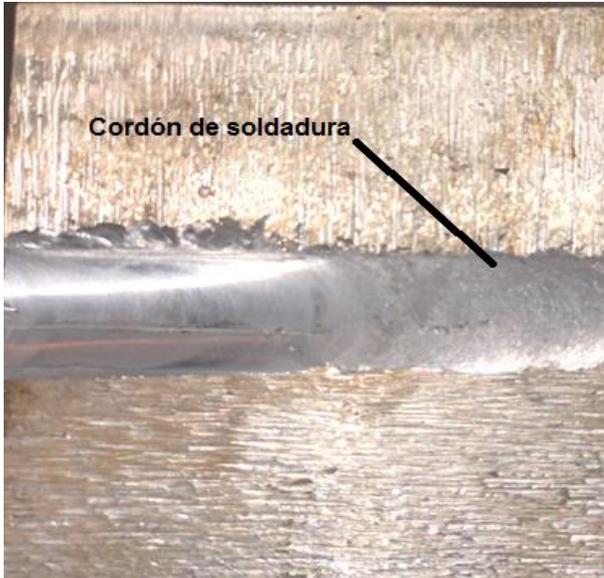


Figura 2.9. Probeta soldada.

La soldadura por fricción y agitación se realizó en las siguientes condiciones de trabajo:

Tabla 2.3. Condiciones de trabajo para realizar la soldadura

<b>Parámetros</b>	<b>Valor estimado</b>	<b>Unidad de medida</b>
Velocidad de rotación (n)	1400 -1600	Rpm
Fuerza de calentamiento (F1)	800	Kgf
Fuerza de forja (F2)	210	Kgf
Tiempo total de la soldadura (t)	6	Minutos

## 2.5. Evaluación de la soldadura

La evaluación de la soldadura se llevó a cabo con la finalidad de evaluar la calidad de la junta, para esto se realizaron una serie de ensayos destructivos y no destructivos. En primer lugar, se caracterizaron en las posibles imperfecciones en la superficie que pudieron estar presentes en el material soldado, el cual se examinó mediante los ensayos de inspección visual.



### **2.5.1 Inspección visual**

Una vez realizada la soldadura, la junta fue sometida a la inspección visual con el objetivo de detectar las posibles presencias de imperfecciones superficiales, tales como: socavaduras, exceso de penetración etc.

### **2.5.2. Análisis químico del cordón de soldadura**

El análisis químico del cordón de soldadura consistió en la medición de los porcentajes en peso de los principales elementos aleantes presente en el cordón de soldadura. Para el hecho, se tomó una muestra de virutas del cordón. Las técnicas empleadas en las mediciones de los elementos fueron las mismas utilizadas en la caracterización químicas del material base.

### **2.5.3. Evaluación metalográfica de la junta soldada**

Las características estructurales de la unión de soldadura y de las zonas inmediatas a esta, correspondientes al material base, fueron determinados por medio de estudios metalográficos, que consistió en un análisis micrográfico. De esta manera se determinaron de forma conjunta las propiedades referentes al tamaño, distribución y forma de las fases existentes que pudieran tener efectos sobre las propiedades mecánicas del material soldado.

Para llevar a cabo este estudio, se extrajo una probeta de la junta soldada, la cual fue preparada siguiendo procedimientos de la caracterización metalográfica del material base. Después de obtener la superficie pulida a espejo, libre de rayas en la probeta, estaba lista para los análisis micrográficos y macrográficos descrito a continuación.

#### **2.5.3.1. Análisis Micrográfico**

Este proceso consiste en revelar las fases presentes de la soldadura, el cordón y la zona afectada por el calor del material base, fue llevado a cabo un análisis micrográfico, el cual se hizo en un solo paso debido a la naturaleza del material.

Primero se atacó la probeta con una solución de hidróxido de amonio durante 10 segundos, para la observación de la microestructura del aluminio AA 5456, así como la zona afectada por el calor.



Las macrografías fueron tomadas después del ataque químico realizado a cada zona, con un aumento desde 100x a 400x, utilizando un microscopio óptico de marca WF 10X/22.

## 2.6. Cálculo de la fuerza axial necesaria para el calentamiento

En la soldadura por fricción, el movimiento asociado con la fuerza aplicada debe ser capaz de generar un calor suficientemente alto para reblandecer el metal, que la interfaz se encuentra bajo un estado de deformación plástica y, en consecuencia, la superficie inicial del material se expulsa para formar un “flash” plástico. Por la ecuación 2.1 se determinó la fuerza de calentamiento según Mishra (2007) como:

$$F = P \cdot A \dots\dots\dots (2.1)$$

Donde:

F - fuerza axial necesaria; N

P - presión de calentamiento; MPa

A - área de contacto de la probeta; mm<sup>2</sup>

## 2.7. Determinación del área de contacto o de soldadura

El área de la sección transversal se relaciona con las uniones estándar y se puede modificar para distintos metales basándose en su densidad. Cada soldadura tiene una superficie de sección transversal que se puede determinar directamente por cálculos geométricos. Por la ecuación 2.2 se determinó el área de contacto o de soldadura, y para el cálculo del área se consideró como un círculo y según (Cassillas, 1989) se determina se determina por la siguiente ecuación:

$$A = \frac{F}{P} \dots\dots\dots (2.2)$$

Donde:

F - fuerza axial necesaria; N

P - presión de calentamiento; MPa

A - área de contacto de la probeta; mm<sup>2</sup>



## 2.8. Obtención de la fuerza de contacto

El movimiento durante el proceso se produce normalmente con la utilización de pequeñas distancias de recorrido del orden de 3 - 4 mm/s y a alta frecuencia (32 - 100 Hz). Ello genera un calor por fricción en el plano de contacto y por consiguiente se reblandece un cierto volumen de material. Durante el proceso, una parte del material viscoelástico que se formó se desplaza hasta la periferia de la interfaz de contacto. Esta fuerza de contacto se calcula por la siguiente ecuación 2.3.

$$F_c = \mu \cdot F \dots \dots \dots (2.3)$$

Donde:

$F_c$  - fuerza de contacto; N

$\mu$  - coeficiente de rozamiento dinámico de fricción.

Para el caso del rozamiento aluminio – aluminio;  $\mu = 0,15$



## **2.9. Conclusiones del capítulo 2**

- ❖ Se establecieron las técnicas experimentales relacionadas con el proceso de soldadura por fricción y agitación del aluminio AA 5456, así como la caracterización de cada equipo utilizado en el proceso.
- ❖ Se fundamentaron las propiedades a investigar, donde se definieron los principales parámetros del proceso de soldadura y las variables a tener en cuenta en el proceso de soldadura del aluminio.
- ❖ Se establecieron los regímenes de soldadura a emplear durante el proceso, así como los ensayos de dureza en las probetas de prueba según las condiciones establecidas.



---

## **CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**



### CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos del proceso de soldadura por fricción y agitación (propiedades del material base), propiedades físicas, mecánicas, y estudio sobre el comportamiento microestructural.

#### 3.1. Composición química de la aleación AA 5456

El análisis químico de la aleación de aluminio AA 5456 empleada en la experimentación, se muestra en la tabla 3.1, el mismo se realizó en un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón, ubicado en el laboratorio del taller de fundición de la empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, Moa.

Tabla 3.1. Composición química (%) estándar de la aleación de aluminio AA 5456

Nomenclatura	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
AA 5456	0,238	0,654	0,001	0,412	2,55
	Cr	Ni	Zn	Ti	Co
	0,001	0,001	0,021	0,007	0,001
	Pb				
	0,007				

La composición química es el factor fundamental en la figuración en caliente, puesto que dependiendo de esta, así serán los compuestos intermetálicos formados y las temperaturas de fusión correspondientes, de ella dependerá la formación de compuestos eutécticos.



### 3.2. Fases de la microestructura

Tabla 3.2. Distribución de fases en el material base Muestra 1.

<b>Cliente:</b>	Soldadura Batida				
<b>Data:</b>	15/04/2019 12:11:46	<b>Mag:</b>	1	<b>Calibracion:</b>	1 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
<b>Unidad:</b>	microns	<b>Área:</b>	841728	<b>Número de campo:</b>	1
<b>Nombre de la muestra:</b>	Material base x100	<b>Muestra Id:</b>	M1	<b>proveedor:</b>	

El estudio de la distribución de fases de la estructura, se determinó a través de un software profesional, así como se muestra en la figura 3.1. cuyos resultados están descritos en la tabla 3.3 y en la gráfica.

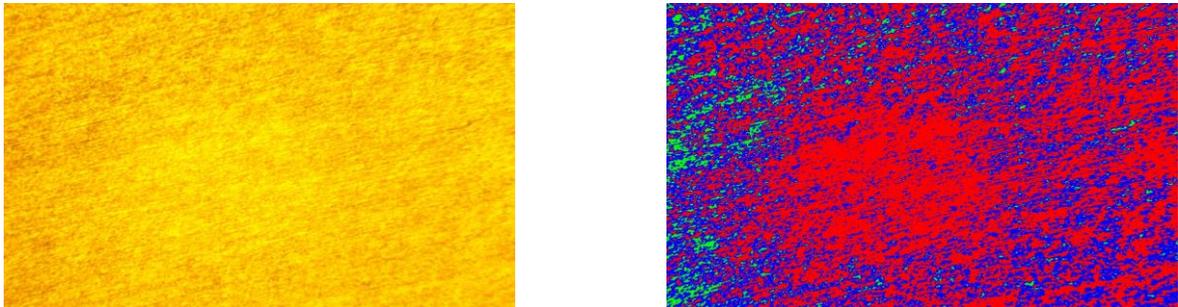
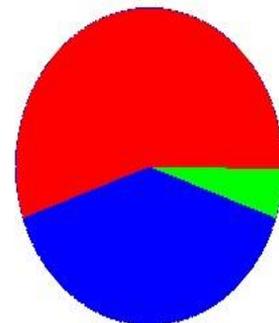
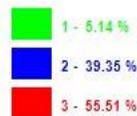


Figura 3.1. Microestructura de la aleación de aluminio AA 5456

Tabla 3.3. Datos de la fase

Fase Data		
Elementos	Área	Área%
1	43260	5,14
2	331197	39,35
3	467271	55,51





### 3.3. Determinación de las temperaturas del proceso

Los resultados obtenidos de las temperaturas, según los parámetros empleados en el proceso de soldadura por fricción radial o rotativa, se muestran en la tabla 3.4. Se considera la temperatura de fricción y de forja.

Tabla 3.4. Valores obtenidos en el proceso de soldadura.

Niveles	Variables		Salida	
	Número(rev/min)	Presión (Mpa)	Temperat. de fricción (°C)	Temperat. de forja (°C)
-1	1400	1,9		
1	1600	1,9		
<b>Ensayos</b>				
1	1400	1,9	341	330
2	1400	1,9	343	230
3	1600	1,9	346	225

Los resultados obtenidos en las diferentes temperaturas 1400 °C y 1600 °C, en dependencia de cada variación de los parámetros de soldadura, para la de fricción están entre un 48 y un 52 % de la temperatura de fusión de la aleación de aluminio y entre un 31 y 43 % para la de forja. Esta se obtiene al disminuir la velocidad de rotación, así mismo, la menor fuerza axial sobre la junta también ejerce un ligero efecto en el pico de temperatura. Las temperaturas, tanto de forja como de fricción, se caracterizan por ser el momento en el que la temperatura máxima es alcanzada sin llegar a la fusión, pero sí al punto de plasticidad, así como la pieza móvil retoma la posición final deteniendo el movimiento de fricción, durante este método de unión en estado sólido, el comportamiento mecánico de los materiales soldados cuya estructura y propiedades se degrada con el aumento de la temperatura, y la determinación de la distorsión (la cuál es mínima en este proceso), bajo los niveles de estrés residual obtenidos.

Ambas temperaturas (de fricción y de forja) independientemente que logren fusionar los dos elementos entre sí, sirve para depurar, en la zona de unión, las imperfecciones encontradas en el material y lograr una integración microestructural. Al aumentar la temperatura a (350 °C), debido al movimiento giratorio de fricción y



cargas aplicadas, sobrepasan las de precipitación, ocurre un sobre envejecimiento que causa una coalescencia de los precipitados finos en la estructura de la aleación y reduce la dureza en esta zona. La resistencia se incrementa con el aumento de la velocidad, lo cual está en correspondencia con un menor calor aportado y un ciclo térmico menos prolongado. Esto puede coincidir con una mayor dureza de la zona térmicamente afectada y posiblemente con una menor alteración metalúrgica, refutado además por (Badeshia, y otros, 2006)

### 3.3.2. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se realiza con la finalidad de conocer la resistencia del material base y las juntas soldadas, mediante la aplicación de dos cargas que tienen la misma dirección del eje de junta, pero con sentido diferente. Los resultados de ensayo de tracción de la junta soldada.

Tabla 3.5. Resultados de ensayo de tracción de la junta soldada.

<b>Código</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga máxima aplicada (MPa)</b>	<b>Límite de fluencia (Mpa)</b>	<b>Resistencia a la tracción (Mpa)</b>	<b>Elongación (mm)</b>
Muestra 1	120x60	221,76	97	118	0,17
Muestra 2	120x60	157,5	101	122	0,20
Muestra 3	120x60	168,25	128	169	0,38

El mejor resultado presenta la muestra número 3, fue soldada a una temperatura de 330 °C, obteniendo un valor promedio de 221,76 MPa, muy cercano a la resistencia del material base, como se muestra en la tabla 3.6.



Tabla 3.6. Porcentaje de eficiencia de la soldadura según su resistencia a la tracción.

<b>Código</b>	<b>Resistencia a la tracción promedio (Mpa)</b>	<b>Resistencia a la tracción promedio del aluminio (Mpa)</b>	<b>Porcentaje de la eficiencia de la soldadura <math>\eta</math> (%)</b>
Muestra 1	221.76	233	95.2
Muestra 2	157.5	233	67.6
Muestra 3	168.25	233	72.2

En la tabla 3.6. se aprecia que el primer grupo de muestras ensayadas tiene en promedio una mejor eficiencia comparando su resistencia a la tracción.

Todas las juntas ensayadas presentan la falla en la unión de soldadura, esto se debe a la carencia de un cuerpo central (Figura 2.9.) y a la forma de sujeción de la probeta en la máquina de ensayo. Esta falta de distancia en el cuerpo central de la probeta soldada se debe en parte al encogimiento axial y a las limitaciones de la máquina de soldadura por fricción, que permite introducir probetas con más de 120x60 mm. Con los resultados obtenidos se observa que cada una de las uniones varía su resistencia, esto debido a que la máquina de soldadura por fricción utilizada realiza la soldadura de manera sencilla, la presión de calentamiento y de forja, son proporcionada por la herramienta y la carga se realiza de manera manual. Sin embargo, pese a estas limitaciones los valores de los esfuerzos obtenidos son cercanos a la resistencia mínima a tracción del aluminio el cual tiene un valor de 233 MPa.

### 3.3.3. Micrografía de la muestra de aluminio



Figura 3.2. Características de la aleación AA 5456



Figura 3.2. Aleación 5456. Las partículas son (FeMn) Al (amarillo), MgSi (negro) y MgAl (precipitado fino). No existe una red continua de precipitados en los límites de grano. Aumento de 100x, con ataque químico.

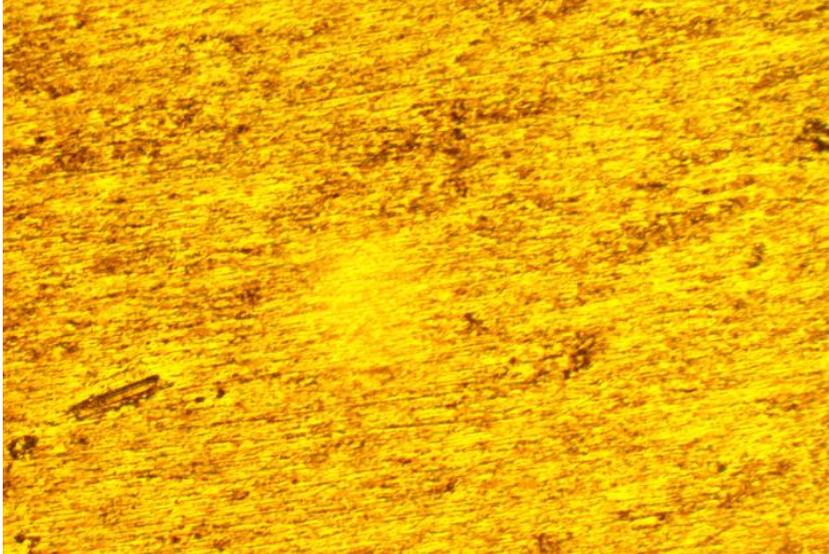


Figura 3.3. Características del material base.

Figura 3.3. Aleación 5456. Las partículas son (FeMn) Al (amarillo), MgSi (negro) y MgAl (precipitado fino). No existe una red continua de precipitados en los límites de grano. Aumento de 400x, con ataque químico.

#### 3.3.4. Zona termomecánicamente afectada de la muestra 3

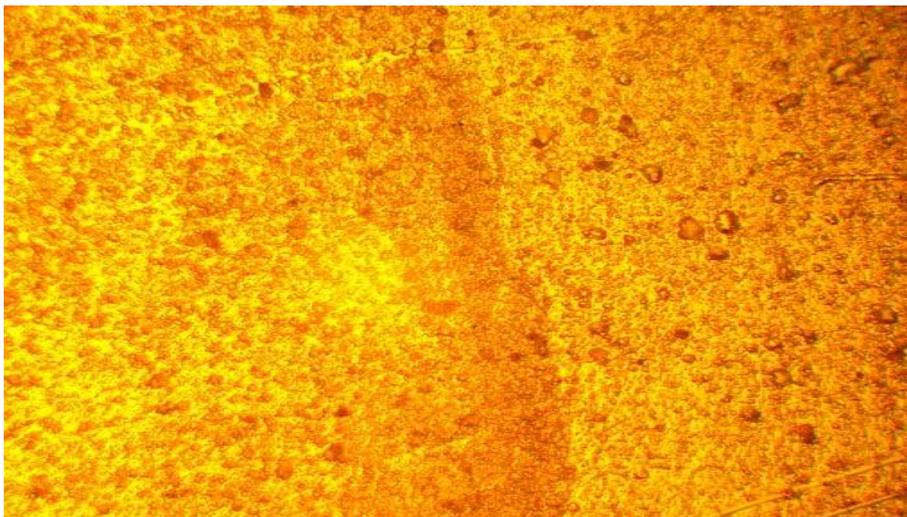


Figura 3.4. Microestructura de la zona central



Figura 3.4. La microestructura de la zona central (ZTMA) muestra granos muy finos, lo cual puede ser producto de una recristalización dinámica, se observa una reorientación de los granos originales y cierto grado de recristalización. En la otra zona (ZAT) el efecto térmico produjo una disminución en el tamaño de los granos, pero no con una disminución como en la ZTMA, la microestructura ha permitido definir los mecanismos de endurecimiento y crecimiento y la disolución de precipitados. Aumento 100x

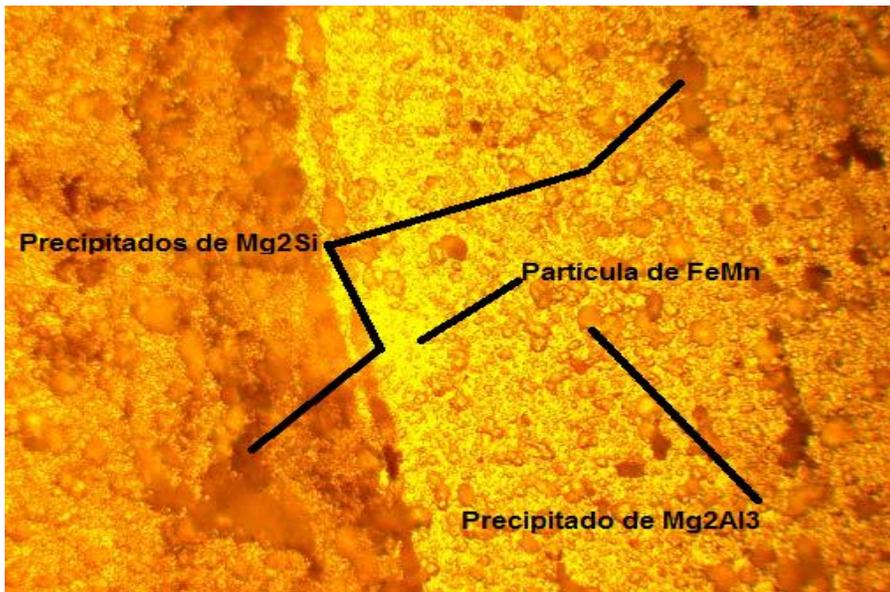


Figura 3.5. matriz texturada del material base y los granos recristalizados en la zona afectada térmicamente (ZAT), en la ZTMA

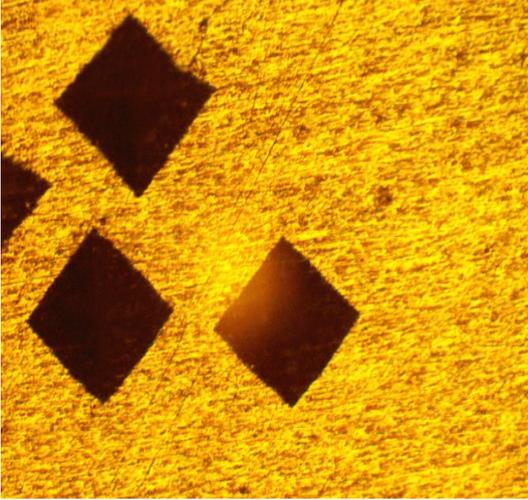
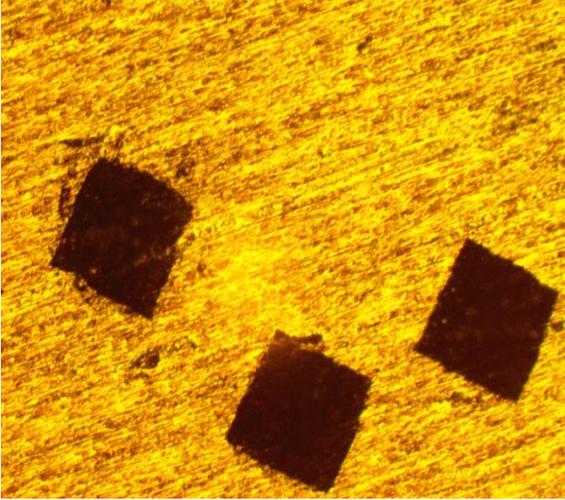
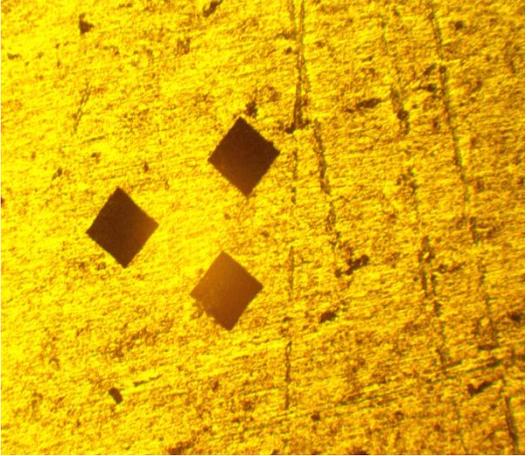
Figura 3.5. Se observa una la matriz texturada del material base y los granos recristalizados en la zona afectada térmicamente (ZAT), en la ZTMA se aprecia a partir del límite o interfase con los granos que conforman el cordón de la unión. Se puede apreciar el crecimiento de los precipitados de  $Mg_2Al_3$  cuyos granos se distinguen de las formas típicas encontradas en el material base. La primera zona está conformada por el grupo de granos ubicados en ambos extremos del ancho de cordón. Aumento 400x



### 3.3.4. Microdureza

Las microdurezas se realizaron a lo largo del eje axial, partiendo desde la unión hasta llegar al material base correspondiente, como se muestra en la siguiente tabla 3.7.

Tabla 3.7. Puntos de microindentación en la muestra.

<b>Ensayos de microdureza en las tres muestras</b>	
<p>Material base (MB)</p>  <p>200x aumento</p>	<p>Zona afectada por el calor (ZAC)</p>  <p>200x aumento</p>
<p>Zona termomecánicamente afectada</p>  <p>100x aumento</p>	



Se le aplica una carga de 100 gf, con un tiempo de duración de cada microindentación de este estudio de 15 segundos, según está establecido por la norma ASTM E384.

El número de dureza Vickers en cada ensayo realizado, se calcula por la razón de la carga aplicada sobre el diámetro al cuadrado de la longitud diagonal media de la indentación, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$VH = 1854,4 \frac{P}{d^2} \dots \dots \dots (3.1)$$

Ecuación 3.1. Número de durezas Vickers. Fuente: (P.A.Stiopin, 1985)

Donde:

P: carga aplicada (gf)

d: longitud diagonal media de la indentación (µm)

A continuación, en la tabla 3.8. se observa la variación mínima de la dureza desde la interfaz hasta en cada uno de los extremos de las probetas de aluminio:

Tabla 3.8. Resultados del ensayo de microdureza.

<b>Resultados de la dureza vs distancia</b>				
		<b>Dureza (HV)</b>	<b>Distancia (µm)</b>	<b>Tiempo (s)</b>
<b>Muestra 1</b>	Zona batida	32,37	172,13	15
	ZTMA	31,14	171,86	15
	ZAC	36,22	160,25	15
<b>Muestra 2</b>	Zona batida	33,25	167,69	15
	ZTMA	31,39	172,63	15
	ZAC	29,54	174,38	15
<b>Muestra 3</b>	Zona batida	31,,25	172,88	15
	ZTMA	31,46	171,19	15
	ZAC	30,89	172,75	15



### 3.4. Valoración económica

En la evaluación de los distintos materiales aplicables en un proyecto, se debe tener en cuenta no solo el costo de adquisición, sino el de mantenimiento, reparación eventualmente, de recambio. La tabla 3.9 muestra la valoración económica del proceso.

Tabla 3.9. Costo del proceso de soldadura

Nº	Operación	Equipo	Tiempo en horas	Tarifa horaria en CUP	Importe en CUP
1	Soldar	Fresadora	0,1	3	0,3
2	Corte	Cortadora	0,25	4	1
3	Pulido	Pulidora	0,5	2	1
4	Encapsular	Encapsuladora	0,25	6	1,5
5	Observación	Microscópio	1	5	5
<b>Total</b>					<b>8,8</b>

Los costos operacionales u operativos serán la repercusión que tenga la inversión sobre los costos totales de la empresa, es decir, incremento de materias primas, de gastos de mano de obra o de gastos generales. Estos costos figuran en la cuenta de resultados del período y tienen un tratamiento financiero diferente al costo de adquisición de la inversión. En la tabla 3.10 se muestran los costos de mano de obra directa.

Tabla 3.10. Costos totales de la mano de obra directa

Mano de obra directa	CUP
Salario mano de obra	8,8
Vacaciones (8,1 %)	0,71
Salario complementario	9,5
Aporte a la seguridad social(12 %)	1,12
Impuesto sobre la fuerza 5%	0,47
<b>Total</b>	<b>20,6</b>



Los costos estimados en la tabla 3.10 se relacionan con los costos directos, que incluyen la cantidad pagada por diseños, materiales, equipos, salarios directos, es preciso identificar todas las alternativas técnicas posibles, en función de las circunstancias materiales y de las tecnologías disponibles. Para obtener un costo total de una soldadura en particular se deben incluir otros renglones. Estos materiales van a incrementar los costos de soldadura y serán considerados dentro del costo total de soldadura y como costos adicionales. La tabla 3.11 muestra el costo por concepto de materiales directos.

Tabla 3.11. Costos de los materiales directo, en CUP

Nº	Materiales	Cantidad	Precio material	Importe material
1	Placa de aluminio 120x60	6	0,07	0,42
2	Lija de 240	1	0,48	0,48
3	Lija de 1200	1	0,55	0,55
4	Lija de paño	1	0,3	0,3
5	Hoja de segueta	1	0,81	0,81
<b>Total</b>				<b>2,56</b>

Para determinar el costo de la energía eléctrica se tuvo en cuenta la tarifa de pago del MINEM a la UNE, tarifa A1, que es el pago en CUC, con una demanda contratada de 1500 kW, en los diferentes horarios (pico, normal y madrugada). La tarifa de pago de CUC 0,04 es la tarifa eléctrica establecida en horario normal. En la tabla 3.12 se muestran los costos por consumo de energía eléctrica.

Tabla 3.12. Costos del consumo de corriente eléctrica

Nº	Equipo	Horas de consumo eléctrico	Precio kW.h (CUP)	Importe kW.h (CUP)
1	Fresadora	0,1	0,004	0,0004
2	Cortadora	0,25	0,01	0,0025
3	Pulidora	0,5	0,02	0,01
4	Encapsuladora	0,25	0,01	0,0025
5	Microscópio	1	0,04	0,04
6	Microdurometro	6,75	0,27	1,8225
<b>Total</b>				<b>1,8779</b>



Tabla 3.13. Costos totales del proceso de soldadura

<b>Costos totales</b>	<b>CUP</b>
Mano de obra directa	20,6
Materiales directos	2,56
Energía eléctrica	1,8779
<b>Total</b>	<b>25,0379</b>

El costo total del proceso es de 25,0379 CUP, sin considerar los ensayos de ultrasonido y el de líquidos penetrantes.

### **3.5. Valoración del impacto medio ambiental**

La base de la existencia de cualquier organización es el producto o servicio que ofrece a la sociedad. Las compañías que cumplen las necesidades de los clientes con productos o servicios atractivos, útiles y de alta calidad encuentran clientes, aquellos que no lo hacen no sobreviven. Así una decisión crítica para los ingenieros es la selección, definición y diseño de los productos. El objetivo de una decisión de producto es la de cumplir las demandas del mercado con una ventaja competitiva.

Actualmente son cada vez más los productos que se diseñan teniendo en cuenta los aspectos medioambientales a lo largo de su ciclo de vida completo. La protección medioambiental integrada se lleva a la práctica como idea global, desde el producto ecológico, pasando por el proceso de producción que protege el medio ambiente, hasta llegar a la reutilización y la eliminación de residuos ecológicos. Todas las áreas quedan incluidas, desde la investigación y el desarrollo, hasta la distribución.

El impacto medioambiental que un producto pueda tener, está determinado en gran medida por su etapa de diseño. El objetivo actual de las empresas en el mundo, es crear productos que sean medioambientalmente adecuados a lo largo de su ciclo de vida, para lo cual se invierten muchos recursos en mejorar el diseño de los productos, con el objetivo de minimizar la huella que los productos generan en el medio ambiente.



### **3.5.1. Impacto ambiental que genera el ultrasonido**

Existen criterios de salud que establecen las dosis máximas acumuladas, las cuales se incrementan con la edad. En general, antes de los 18 años, la exposición a la radiación debe ser nula. Después de esa edad, es posible acumular 5 rem por año (0,05 Sv, por año), pero sin exceder la dosis de 12 rem en un año.

El principal objetivo de la protección radiológica es mantener al mínimo las dosis de radiación que reciben los operadores, lo cual se logra limitando la intensidad de la radiación y los tiempos de exposición. Como la intensidad de la radiación decrece inversamente proporcional a la distancia de la fuente, es importante definir un área de exclusión o de acceso restringido donde se encuentran las fuentes de radiación.

El monitoreo de la radiación en las instalaciones y del personal que ahí labore es un requisito fundamental en los programas de seguridad radiológica. El riesgo de fugas radiactivas en una instalación requiere evaluaciones periódicas para monitorear cada fuente radiactiva en condiciones de máxima intensidad. Adicionalmente, todo el personal asignado a las áreas restringidas está obligado a portar placas de medición, o dosímetros para registrar las dosis recibidas diariamente. De igual manera, deben existir registros históricos de las dosis acumuladas de todos y cada uno de este personal.

### **3.5.2. Impacto ambiental que generan líquidos penetrantes**

Cuando se utilizan técnicas por líquidos penetrantes, existen varios aspectos de seguridad que hay que tomar en cuenta para garantizar la integridad de los inspectores. En primer lugar, es importante que el área de trabajo tenga una ventilación adecuada para evitar riesgo de intoxicación o incendio, especialmente cuando se emplean solventes. Por lo general, los líquidos y sustancias que se aplican son irritantes a la piel, por lo que se deben utilizar guantes y gafas.

Cuando se aplican polvos reveladores, el uso de máscaras es indispensable para evitar que sean inhalados por el inspector y se exponga a daños en las vías respiratorias. En los métodos tipo I, el manejo de la luz ultravioleta debe hacerse con cuidado a fin de evitar sobreexposición de la piel, o de los ojos. Finalmente, otro



---

aspecto fundamental es cuidar la compatibilidad química de las sustancias con el material que se va a inspeccionar y las sustancias que éste puede contener.



### **3.6. Conclusiones del capítulo 3**

- ❖ Se determinó que durante la soldadura por fricción y agitación del aluminio AA 5456, a medida que se incrementa la velocidad de soldadura disminuye el calor de aporte y el ciclo térmico menos prolongado, trayendo consigo la disminución del tamaño del grano.
- ❖ Se comprobó mediante el análisis microestructural que, independientemente de los parámetros de soldadura empleados en el proceso y por la temperatura de fricción obtenida hubo cambios en la microestructura.
- ❖ Se pudo determinar a través de los ensayos no destructivos de microdureza, variaciones mínimas con respecto a las diferentes zonas analizadas, alcanzando así una buena unión metalúrgica en la aleación.



## CONCLUSIONES GENERALES

- ❖ Se comprobó mediante el proceso de soldadura por fricción y agitación a la aleación de aluminio AA 5456, con una frecuencia de rotación de 1400 y 1600 r/min y presión de 1,9 MPa, se obtiene un exitoso efecto metalúrgico en la unión, con la formación de diferentes zonas, caracterizadas por la disminución del tamaño del grano.
- ❖ Mediante los ensayos de tracción se demostró que las juntas soldadas poseen una resistencia a la tracción promedio de 221,76 MPa, es decir un 95,2 % de mejoría en comparación con la resistencia del material base que posee una resistencia de 233 MPa.
- ❖ Se determinó en las microestructuras obtenidas, precipitados de  $Mg_2Si$ , que incrementan la dureza en la junta soldada,  $Mg_2Al_3$  y  $FeMn$ , producto de las variaciones en la temperatura de fricción que oscila entre 341 y 346 °C y la de forja desde 225 °C según el número de revoluciones y las presiones aplicadas en ésta zona.
- ❖ Se estableció que en el proceso de soldadura se tiene una inversión de CUP 25,0379.



---

## RECOMENDACIONES

- ❖ Realizar un estudio complementario sobre las uniones soldadas en un rango más amplio de velocidades de soldadura y rotación, para encontrar las condiciones óptimas del proceso.
- ❖ Realizar el diseño de productos y el desarrollo de los procedimientos de soldadura, que puedan ser manufacturados por medio de este proceso.
- ❖ Realizar un estudio más profundo sobre el efecto de la geometría del pin cuadrado sobre el flujo plástico con el fin de obtener juntas sanas de mejores propiedades mecánicas.
- ❖ Realizar la medición de temperaturas pico sobre las diferentes zonas de la junta de tal manera que se puedan relacionar con los cambios microestructurales y sus propiedades mecánicas.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Adams, J. A. 2013.** *Characterization and optimization of direct friction welding parameters in small stainless tube welds*,. s.l. : Montana State University-Bozeman, college of Engineering, 2013.
2. **American Welding Society. 2007.** *Welding Handbook 9th Edition, Vol 3 Welding process*. Miami : s.n., 2007.
3. **Arletis, Fernández Romero. 2017.** *Comportamiento microestructural de una unión disímil realizada por proceso de soldadura de rotación continua*. Moa : ISMMM, 2017.
4. **Badeshia, H. y Honeycombe, R. 2006.** *R. Steels, Third edition*. Butterworth-Heinemann. s.l. : Oxford, UK., 2006.
5. **Bedoya, Lucas Orlando Urbano. 2011.** *Estudio metalúrgico de las uniones soldadas por fricción-agitación de la aleación de aluminio aa 6261-t5*. Santiago de Cali : Universidad del Valle, 2011.
6. **Brien, R. L. O`. 1996.** *Manual de Soldadura Tomo III 8a Edición*. Mexico : Pearson Educación, 1996.
7. **Cassillas, A. 1989.** *Máquinas, cálculo de taller*. s.l. : Editorial científico Técnicas, pp 133, 1989.
8. **D y Serafin. 1974.** *Las soldaduras*. españa : pueblo y educación, 1974.
9. **Dallam y Damkroger. 1993.** *Caracterización de soldaduras*. s.l. : ASM Internacional, 1993.
10. **Daza, José Luis Venegas y Calderon, Julian David Rodriguez. 2018.** *Caracterización mecánica y microestructural de uniones soldadas de aluminio serie 6061 mediante el método de soldadura por fricción-agitación (fsw)*. Bogotá d.c., Colombia : Universidad libre, sede bosque popular, facultad de Ingeniería Ingeniería Mecánica, 2018.



11. **Díaz, Julian Arnaldo Avila. 2011.** *Comportamiento a la fatiga de las uniones soldadas por fricción-agitación de la aleación de magnesio AZ31B.* Santiago de cali : Universidad de Valle, 2011.
12. **Duponchelle, J. 1932.** *Manual del fundidor.* España : 1ra Edición. Barcelona, 1932.
13. **Dvornak. 1989.** *Soldadura y refinamiento de granos de la aleación de aluminio.* Whashington : Pueblo y educación, 1989.
14. **González, Luis Ricardo Cardo López. 2013.** *SOLDADURA POR FRICCIÓN.* Colombia : Universidad del Bío-Bío, 2013.
15. **González, Luis. (2013).** *Tesis.* Chile : Universidad del Bío-Bío; Sistema de bibliotecas , (2013).
16. **Groover, M. P. 2007.** *Fundamentos de Manufactura Moderna: materiales, procesos y sistemas.* España : Santa Fe: McGraw-Hill, Interamericana de España S.L 3ra Edición, 2007.
17. **Guliaev. 1983.** Moscú : Editorial Mir, 1983.
18. **Guliaev y A. 1983.** *Metalografía.* Moscú : Editorial Mir, 1983.
19. **2019.**  
<https://support.google.com/legal/answer/3463239?sa=X&ved=2ahUKEwiq5qrL0NnhAhVjx1kKHWJ0AbcQIZ0DegQIARAB>. [En línea] 18 de Mayo de 2019.
20. **Ignoto. 2001.** *Manual de soldadura para ingenieros.* 2001.
21. **José, Sanz, Pedro - y Elorz. 2000.** *Ciencia e ingeniería de materiales 3ra edición.* Madrid : Graficas Muriel,S.A., 2000.
22. **Khan, I. A. 2011.** *Experimental and numerical investigation on the friction welding process" Doctor of Philosophy.* Hyderabad : Jawaharlal Nehru Technological University, 2011.



23. **Lashkó, N F, S:V y Lashkó. 1979.** *Soldadura indirecta de metales.* Moscú : Editorial Mir, 1979.
24. **López, L. 2013.** *Soldadura por fricción.* Chile : Universidad Bio-Bio, 2013.
25. **Maldonado, C. 2001.** *The effect of interlayers on dissimilar friction weld properties; Doctor in Applied Science.* Canada : University of Toronto, 2001.
26. **Mehl, Robert F. 1972.** *Atlas of Microstructures of Industrial Alloys ; 8th Edition; metals handbook.* united states of america : american society for metals, 1972.
27. **Méndez, M. 2011.** *Efecto de la velocidad de rotación en la cantidad de la unión de la soldadura por fricción en una aleación de aluminio AA 6063. Trabajo de grado para Ingeniería Metalúrgica.* Venezuela : Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre" Barquisimeto, 2011.
28. **Murphy. 1991.** *Electron Beam.* Washington : Pueblo y educación, 1991.
29. **O'Brien, R. 1996.** *Manual de Soldadura. Tomo III. American Welding Society. 8ª Edición.* México : Naucalpan de Juárez, 1996.
30. **Ocaña, Israel Lamurú. 2017.** *Deformación superplástica de la aleación de Titanio Ti - 6 AL - 4 V mediante soldadura por fricción rotativa.* Moa : ISMMM, 2017.
31. **P. Heurtier a, M.J. Jones b , C. Desrayaud a , J.H. Driver a,\* , F. Montheillet a , D. Allehaux. 2004;.** Mechanical and thermal modelling of Friction Stir Welding. *Journal of Materials Processing Technology* 171 (2006) 348–357. EADS CCR, Corporate Research Center France, 12 rue Pasteur, BP 76, 92152 Suresnes Cedex, France, 2004;.
32. **P.A.Stiopin. 1985.** *Resistencia de Materiales.* URSS : Mir. 1979, 1985.
33. **Paul, Angamarca P A y Stiven, Garcia. 2018.** *Estudio y caracterización de la soldabilidad en materiales disímiles aluminio (6061) - latón (C38500) mediante el proceso de soldadura por fricción.* Quito : s.n., 2018.



34. **Pedro, y otros. 2003.** 2003, Revista Materia ISSN, pág. 3...
35. **Peel, M., Steuwer, A y Withers, P. 2006.** *Dissimilar friction stir welds in AA 5083 - AA 6082. Part I: process parametr effects on thermal history and weld properties.* s.l. : Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 37, no. July, pp 2183 - 2193, 2006.
36. **Ramírez, Maria Angelica Alvarado. 1999.** *Relación entre microestructura y propiedades en piezas vaciadas de aluminio.* París : Universidad Autonoma de Nuevo León, 1999.
37. **Ramulu y Rubbert. 1990.** *Electron Beam.* Whashington : Pueblo y educación, 1990.
38. *Revista Materia ISSN. Pedro, y otros. 2003.* 2003, soldadura por fricción y agitación, págs. Disponible en: pereyra.sebastian@gmail.com, glombera@fi.mdp.edu.ar, santiagourquiza@fi.mdp.edu.ar,.
39. **Rodríguez, Ing. Amable Seberino Chirino. 2015.** *Aleaciones de aluminio de las series AA 2218, AA 5050 y AA 6082 para la fabricación de casquillos de eslingas.* Holguín : ISMM, Moa, 2015.
40. **Rodríguez, René Legrán. 2018.** *obtención de una unión bimetálica aluminio - cobre mediante el proceso de soldadura de torque: propiedades físicas-metalurgicas.* Moa Holguín : ISMM, 2018.
41. **Romero, Elías Efraín Gusmán. 2017.** *Efecto del proceso de soldadura por fricción radial en una aleación de aluminio AA 5754.* Moa : ISMMM, 2017.
42. **S.Avner.** *Introducción a la metalurgia física, 2da Edición.* México: McGraw-Hill : Interamericana de México S:A.
43. **S.L.Kakani. 2006.** *Material Science, 1st Edition.* New Delhi : New Age International, 2006.
44. **Shrikrishana Asif. M. A., K. Sathiya, y P. April, 2019.** *Finite element modelling and characterization ofo friction welding on UNS S31803 duplex stainless steel joints.* s.l. : Eng. Sci. Technol. Int. J., vol 18, April, 2019.



- 
45. **Srivantsan y Sundarshan. 1991.** *Proceso de soldadura.* Whashington : pueblo , 1991.
  46. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.* **ASTM. 2017.** West Conshohocken : ASTM International, 2017.
  47. **Sunwooo y Morris. 1989.** *soldadura de aleación de aluminio.* 1989.
  48. **Tamayo, Dargel Pérez. 2017.** *El efecto de la soldadura por fricción radial en una aleación AA 5754.* Moa : ISMMM, 2017.
  49. *Welding Essentials.* **Galvery, W. L. y Marlow, F. M. 2001.** Industrial Press Inc : Questions; Answars, 2001.
  50. **Woo, W., y otros. 2011.** *Neutron diffraction measurements of residual stresses in friction stir welding: a review,* . s.l. : Science and Technology of Welding and Joining, vol. 16, no. 1,pp. 23, 2011.
  51. **Zander, J y Sandstöm, R. 2008.** *Materials and Design.* 2008.

