

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**Escuela de Posgrado**

**Maestría en Ingeniería de Soldadura**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**EFFECTO DE LA VARIACIÓN DE PARÁMETROS EN LA  
MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN LA SOLDADURA  
POR FRICCIÓN BATIDO BAJO ALIMENTACIÓN CONTINUA DE LÍQUIDO  
REFRIGERANTE DEL ALUMINIO AA5052-H32, Y SU COMPARACIÓN CON  
EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN BATIDO CONVENCIONAL**

*Trabajo de investigación para optar el grado de  
Magíster en Ingeniería de Soldadura*

**Presentado por:**

Franco Orestes Rodríguez Yengle

**Asesor:**

Dr. Ing. Paul Pedro Lean Sifuentes

**Pando – LIMA**

**2018**



*Dedico el presente trabajo a mis padres,  
Santos y María Elena, que con su amor incondicional  
y sus consejos, me apoyan siempre a lograr  
las metas que me he propuesto.*

*A mi abuela Francisca, que siempre me dio  
su bendición, y que desde el cielo sé que me cuida siempre.*

## AGRADECIMIENTOS

- A mis padres, por su apoyo incondicional en todo aspecto de mi vida.
- A mi asesor de tesis, el Dr. Paul Lean que, con su experiencia y consejo, me ayudaron en cada paso de la realización del presente trabajo.
- Al laboratorio de manufactura y en especial al profesor José Brañez, ya que sin su ayuda no me hubiera sido posible realizar los diversos experimentos ni corregir los muchos errores que tuve en la realización de los mismos.
- Al CITE Materiales de la PUCP, como también a sus asistentes y analistas, sin los cuales no hubiera podido realizar ninguno de los ensayos que se detallan en el presente trabajo.
- Al CAM PUCP y al Dr. Jose Fernandes, que con su experiencia me apoyó en la microscopía electrónica de barrido.
- A Milagro Nuñez, que estuvo y está a mi lado en todo momento, y que me contagió de su paciencia y ganas, para poder terminar el presente trabajo.
- A mis tías, Rogelia y Juanita, que se preocupan por mí hasta en la distancia.
- A mis compañeros de maestría, Jesús y Ernesto, el trabajo en equipo siempre fue necesario en la consecución de este y sus trabajos.
- A mis ex compañeros de trabajo: José Caycho, Maicol Quintana, y demás, que me animaron a sumergirme en el tan interesante mundo de la soldadura.

## RESUMEN

La soldadura por fricción batido es un proceso de soldadura en estado sólido ampliamente usado en la unión de una amplia gama de metales comúnmente difíciles de soldar por procesos convencionales, entre los que destaca el aluminio y sus aleaciones, por lo que se usa como una alternativa muy útil para obtener juntas sanas y con una resistencia superior al promedio por tales procesos convencionales. En los últimos años, han aparecido variaciones y mejoras del proceso de soldadura por fricción batido, entre los que destaca la soldadura por fricción batido bajo el agua o bajo alimentación continua de líquido refrigerante, procesos que mejoran aún más las características microestructurales y las propiedades mecánicas de las juntas de aluminio soldadas.

En el presente trabajo se realizó la comparación, análisis de la microestructura y obtención de las propiedades mecánicas de juntas soldadas a tope de planchas de la aleación de aluminio AA5052-H32 de 3mm, mediante el proceso de fricción batido convencional y bajo alimentación continua de refrigerante. Se emplearon diversos parámetros de soldadura, como velocidad de rotación y avance, con el objetivo de obtener juntas sanas y sin defectos. Se evaluaron los cupones por inspección visual y examinación radiográfica y se seleccionaron los cupones con juntas sanas y sin defectos para realizar los ensayos. Se realizó microscopía óptica para comparar y analizar las regiones características de las zonas soldadas, así como ensayos de dureza y tracción a la sección de soldadura, para comparar y analizar ambos procesos realizados, así como con las propiedades del metal base. Se analizó también las superficies de fractura.

Se obtuvieron juntas sanas y sin defectos a 1000 rpm y 100 mm/min empleando el proceso de soldadura por fricción batido convencional y a 1700 rpm y 80 mm/min en el proceso de soldadura bajo alimentación continua de líquido refrigerante. Se observó que el efecto de ésta última es reducir el crecimiento del tamaño de grano, lo cual resulta en una mejora de las propiedades mecánicas de la junta soldada comparada con el proceso de soldadura realizado por fricción batido convencional, obteniendo valores de resistencia a la tracción de 208.5

MPa en el caso de la soldadura por fricción batido convencional y de 217.3 MPa en la soldada bajo alimentación continua de líquido refrigerante, comparados con los 238.6 MPa en el metal base, lo que se refleja en una eficiencia del 87.4% y 91.1% respectivamente. Las probetas rompieron en el lado de retroceso (LR). Asimismo, se obtuvieron valores ligeramente mayores de dureza en la zona batida del cupón soldado bajo fricción batido con alimentación continua de líquido refrigerante y se confirmó que en la zona de menor dureza es en donde ocurre la fractura. Las superficies de fractura fueron examinadas y presentaron zonas características de fractura dúctil.



## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. ESTADO DEL ARTE	4
1.1. El aluminio	4
1.1.1. Aleaciones de aluminio	5
1.1.2. Aleación de aluminio AA5052-H32	5
1.2. Procesos de unión del aluminio	7
1.2.1. Procesos de unión convencionales	7
1.2.2. Procesos de unión no convencionales	8
1.3. Soldadura por fricción batido	9
1.4. Mejoras en el proceso de soldadura por fricción batido	13
2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	15
2.1. Preparación del metal base	15
2.2. Preparación de la herramienta	15
2.3. Montaje de placas de aluminio	15
2.3.1. Soldadura por fricción batido convencional	16
2.3.2. Soldadura por fricción batido bajo alimentación continua de líquido refrigerante	16
2.4. Parámetros de soldadura	17
2.4.1. Ensayos iniciales	17
2.5. Inspección y ensayos a realizar	18
2.5.1. Caracterización del metal base	18
2.5.2. Inspección inicial de experimentos realizados	18
2.5.2.1. Inspección visual	18
2.5.2.2. Examinación radiográfica	19
2.5.3. Análisis metalográfico	19
2.5.4. Ensayo de dureza	20
2.5.5. Ensayo de tracción	20
2.5.6. Análisis de la superficie de fractura	21

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
3.1. Caracterización del metal base	21
3.2. Inspección inicial de experimentos realizados	22
3.2.1. Inspección Visual y efecto de la variación de las velocidades de rotación y avance.	23
3.2.2. Examinación Radiográfica	24
3.2.3. Obtención de parámetros y probetas para ensayo	26
3.3. Análisis metalográfico	27
3.4. Ensayo de dureza	31
3.5. Ensayo de tracción	33
3.6. Análisis de la superficie de fractura	35
CONCLUSIONES	37
BIBLIOGRAFÍA	39



## INTRODUCCIÓN

El aluminio es el tercer elemento más abundante en la tierra, después del acero es el elemento más empleado en aplicaciones industriales, sobre todo cuando se requiere una buena resistencia a un peso ligero. Para la unión del aluminio y sus aleaciones normalmente se emplean las técnicas de soldadura por fusión, sin embargo, éstas imponen ciertos cambios metalúrgicos y microestructurales críticos al material que se está uniendo [1]. Estos cambios son menos que deseables para ciertas aplicaciones de este material [2]. Debido a esto, se ha realizado profunda investigación en desarrollar y descubrir nuevos procesos y técnicas de unión para los mencionados materiales.

La soldadura por fricción batido (FSW) fue desarrollada en 1991 en el Instituto de Soldadura (TWI) en Reino Unido como un proceso de unión de materiales en estado sólido y esto se aplicó inicialmente a aleaciones de aluminio [3]. Este proceso usa una herramienta rotatoria no consumible especialmente diseñada, la cual es introducida entre los filos de la unión de las placas a soldar, y tiene la función de calentar, deformar plásticamente y mezclar el material que será soldado. En este proceso el material entra en deformación plástica a elevada temperatura, lo cual resulta en la generación de granos finos recristalizados [4]. Fue especialmente adecuado para la soldadura rápida y de alta calidad de aleaciones de aluminio en diversas industrias que normalmente se consideran “no soldables”, ya que al realizarse el proceso debajo de la temperatura de fusión, se eliminan y/o minimizan defectos propios de los procesos de soldadura por fusión convencionales, tales como: porosidades, segregaciones o fisuras en los límites de grano [5].

La serie AA5XXX es ampliamente usada en las industrias marina, militar y aeroespacial debido a su peso liviano, formabilidad, soldabilidad adecuada y buena resistencia a la corrosión, es por eso que se ha aplicado la soldadura por fricción batido en este tipo de estructuras, reemplazando las convencionales uniones por remaches, ya que se evitan problemas como: corrosión, iniciación de

fisuras; y genera un ahorro de costos y peso al eliminar el uso de dichos componentes [6].

Se vienen realizando diversos estudios del proceso de fricción batido empleando diferentes medios refrigerantes y analizando las variables principales que influyen en dicho proceso.

Heirani et al. (2017) han estudiado la diferencia en la soldadura por fricción batido de la aleación AA5083 bajo varios parámetros del proceso y el efecto del ambiente de soldadura (agua y aire) sobre la microestructura y las propiedades mecánicas de la unión soldada. Se reveló que el medio ambiente del agua llevó a una alta velocidad de enfriamiento, de manera que hubo un aumento en la resistencia a la tracción de los cupones enfriados por agua debido a la generación de una estructura de grano mucho más fina, lo que se vio reflejado en un aumento de la dureza del 25% en la zona de batido [7].

Sabari et al. (2016) han estudiado el efecto de los perfiles de la herramienta sobre la microestructura y las propiedades mecánicas de fricción batido bajo agua de la aleación de aluminio AA2519-T87 y se encontró que la unión realizada con un medio de enfriamiento subacuático usando una herramienta de perfil cónico roscado logró una resistencia a la tracción de 345 MPa y eficiencia de junta del 76% [8], la cual fue mayor que otras herramientas usadas y que el otro medio refrigerante usado (aire).

Malarvizhi et al. (2016) han investigado las influencias de la velocidad de desplazamiento de la herramienta sobre las propiedades de tracción de las juntas soldadas por fricción batido bajo agua de juntas de aleación de aluminio de alta resistencia AA2024, se encontró que la unión realizada con una velocidad de desplazamiento de herramienta de 30 mm/min mostró propiedades de tracción superiores (342 MPa) con una eficiencia de junta del 76%, mayor a la obtenida con velocidades de 20 mm/min y 25 mm/min. Esto podría atribuirse a la menor generación de calor, mayor límite de grano y la disminución del ancho registro de distribución de menor dureza [9].

Emad (2014) realizó el proceso de soldadura por fricción batido sumergido para unir dos placas de aleación de aluminio 5083, y muestra que el medio refrigerante afecta considerablemente la historia térmica; así como las propiedades microestructurales y mecánicas de la junta soldada. Asimismo se indica que es crucial controlar la velocidad de rotación y de avance en el proceso para obtener buenas propiedades en la junta [10].

Como se sabe, en los últimos años, la soldadura por fricción sumergida ha surgido. Garg et al. (2014) han investigado el proceso de fricción batido bajo agua, y concluyen que cuando se eligen los parámetros correctos y adecuados, se minimiza varios defectos de soldadura tales como: agrietamiento, fragilización, porosidad. Asimismo concluyen que tal proceso consume menos energía y da mejores propiedades mecánicas sin debilitar la microestructura [11].

Por lo antes expuesto, en el presente trabajo se tiene como objetivo principal:

- Obtener y analizar las propiedades mecánicas y microestructura de las uniones soldadas por fricción batido bajo alimentación continua de líquido refrigerante del aluminio AA5052-H32 y compararlas con las obtenidas bajo fricción batido convencional.

Como objetivos específicos se tienen los siguientes:

- Analizar el efecto de la alimentación continua de líquido refrigerante en el proceso de soldadura por fricción batido.
- Analizar el efecto de la variación de parámetros del proceso en las juntas obtenidas por fricción batido convencional y bajo alimentación continua de líquido refrigerante.
- Analizar las regiones características de las juntas soldadas obtenidas de forma convencional y bajo alimentación continua de líquido refrigerante.
- Obtener los valores de las propiedades mecánicas de ambas juntas soldadas: Resistencia a la fluencia, tracción, dureza.
- Analizar las superficies de fractura de ambas juntas soldadas.

## 1. ESTADO DEL ARTE

### 1.1. El aluminio

El aluminio es uno de los principales componentes conocido de la corteza terrestre, de la que forma parte en una proporción del 8.13% superior a la del hierro, que se aproxima en un 5%, y solamente superada entre los metales por el silicio (26.5%).

En la Tabla 1, se muestran algunas propiedades resaltantes del aluminio puro:

**Tabla 1. Propiedades resaltantes del aluminio puro. [12]**

<b>Propiedad</b>	<b>Valor o detalle</b>
<b>Color</b>	Blanco - Plata
<b>Estructura Cristalográfica</b>	Cúbica centrada en las caras
<b>Densidad a 20°C</b>	2.699 g/cm <sup>3</sup>
<b>Punto de fusión</b>	660.2°C
<b>Módulo de elasticidad</b>	64.2 GPa

Es un metal ligero, relativamente blando y de un color plateado con tonalidad brillante. Comparado con el acero, una pieza de aluminio de determinadas dimensiones es tres veces menor en peso a la de la primera en las mismas dimensiones, por lo que se puede inferir que la densidad del aluminio (2.69 g/cm<sup>3</sup>) es casi la tercera parte que la del acero (7.87 g/cm<sup>3</sup>). El aluminio es también conocido por su buena resistencia a la corrosión frente a agentes tales como: aire, agua, aceites, y otros químicos, esto es debido a la presencia de la alúmina, que es una fina capa que recubre el metal y que tiene propiedades refractarias, es decir una temperatura de fusión muy elevada, por lo que ésta deberá ser retirada antes de operaciones tales como la soldadura (por fusión). El aluminio puro tiene aplicaciones principalmente en el ámbito eléctrico, debido a su excelente conductividad eléctrica, sin embargo tiene pobres propiedades mecánicas en comparación con sus aleaciones [13].

### 1.1.1. Aleaciones de aluminio

El aluminio se alea principalmente con el Cobre (Cu), Magnesio (Mg), Silicio (Si), y Zinc (Zn). También se suelen añadir pequeñas cantidades de Cromo (Cr), Hierro (Fe), Níquel (Ni) y Titanio (Ti). Existen multitud de aleaciones de aluminio, con la ventaja de que cada una de ellas posee alguna característica superior a la del aluminio sin alear.

Son conocidas principalmente las aleaciones de forja, las cuales son identificadas por un sistema de numeración que se detalla en la tabla 2:

**Tabla 2. Series de aluminio.**

<b>Serie</b>	<b>Aleante Principal</b>	<b>Comentarios</b>
1XXX	Aluminio 99% puro (mín.)	El primer dígito determina el aleante principal. El segundo dígito, en el grupo 1 identifica el límite de impurezas, y en los demás grupos define las modificaciones de la aleación. Los dos últimos dígitos, en el grupo 1 indican el porcentaje de aluminio por encima del 99% y en los demás las diferentes aleaciones en la misma serie.
2XXX	Cobre	
3XXX	Manganeso	
4XXX	Silicio	
5XXX	Magnesio	
6XXX	Magnesio – Silicio	
7XXX	Zinc	
8XXX	Otros elementos	

La Tabla 3, muestra los diferentes estados de tratamiento para las aleaciones de aluminio para forja.

### 1.1.2. Aleación de aluminio AA5052-H32

Es una aleación de aluminio - magnesio con buena resistencia mecánica debido a su estado de tratamiento de acritud y estabilizado con grado de endurecimiento semiduro. Es de buena soldabilidad por varios procesos y se presenta principalmente en forma de planchas y son fácilmente endurecibles por deformación.

Su propiedad más importante es su resistencia a la corrosión, especialmente al agua de mar y atmósferas marinas, propiedad que lo hace ideal para aplicaciones

de embarcaciones marinas, así como para el procesado de comidas y bebidas. Tiene también un buen comportamiento a bajas temperaturas, por lo que es ampliamente usado en aplicaciones criogénicas. En la Tabla 4 se muestra la composición química nominal, y en la Tabla 5 las propiedades mecánicas nominales del aluminio AA5052 H32.

**Tabla 3. Estados de tratamiento del aluminio.**

<b>Estado de tratamiento</b>	<b>Definición y características</b>
F	Bruto de fabricación
O	Recocido
H	<p>Endurecido por deformación (acritud) (HXX), en donde:</p> <p>El primer dígito define el tipo de acritud recibido:</p> <p>H1: Acritud solamente  H2: Acritud y recocido parcial  H3: Acritud y estabilizado</p> <p>El segundo dígito define el grado de endurecimiento:</p> <p>HX2: Cuarto duro  HX4: Semiduro:  HX6: Tres cuartos duro  HX8: Duro</p>

**Tabla 4. Composición química nominal del aluminio AA5052. [14]**

<b>Composición, % en peso mínimo</b>									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Otros elem. No especific.		Al, min.
							c/u	Total	
0.25	0.40	0.10	0.10	2.2 – 2.8	0.15 – 0.35	0.10	0.05	0.15	rem

**Tabla 5. Principales propiedades mecánicas nominales del aluminio AA5052-H32. [15]**

<b>Resistencia a la tracción (mín.)</b>	<b>Esfuerzo de fluencia (mín.)</b>	<b>Elongación en 50mm, % (mín.)</b>		<b>Dureza</b>
<i>MPa</i>	<i>MPa</i>	<i>Probeta de 1.6 mm de espesor</i>	<i>Probeta de 13 mm de diámetro</i>	<i>HV (Vickers)</i>
228	193	12	18	68

## **1.2. Procesos de unión del aluminio**

### **1.2.1. Procesos convencionales**

Son usados los procesos de soldadura por fusión más conocidos: Electrodo revestido (SMAW), soldeo MIG (GMAW) y soldeo TIG (GTAW), con las ventajas y desventajas propias de cada proceso tales como:

#### a) Proceso SMAW

Poco utilizado por la falta de homogeneidad y muy malas propiedades mecánicas en el cordón obtenido, necesidad de controlar el contenido de humedad de los electrodos, necesidad de limpieza constante en el procedimiento de soldadura, por lo que genera que el proceso se vuelva lento y con mucha probabilidad de que aparezca porosidad. Es por ello que este proceso va quedando obsoleto.

#### b) Proceso GMAW

Es uno de los procesos más utilizados, en la cual se obtiene buena calidad de la junta y propiedades de tracción bastante aceptables, asimismo, por la naturaleza del proceso es bastante rápida comparada con otros procesos de soldadura por fusión del aluminio (como los procesos SMAW y GTAW) y es bastante versátil en temas tales como: posición, corriente, posibilidad de soldeo en tándem, posibilidad de automatización, así como de realizarlo en forma híbrida (combinación de procesos, por ejemplo GMAW-GTAW).

c) Proceso GTAW

Proceso en el cual se obtiene muy alta calidad de la junta, puede utilizarse aporte o no, de acuerdo a las necesidades del proceso; es bastante versátil en su aplicación (modos, corriente, posibilidad de automatización). Como inconveniente es un proceso poco práctico para espesores mayores a 6 mm. Eficiencias de junta del 65% en la soldadura del aluminio AA6061 son obtenidas de variaciones de este proceso, como por ejemplo el proceso GTAW pulsado, el cual se compara con otros procesos realizados de manera convencional, como el proceso GMAW [16].

En general, con los procesos de soldadura convencionales antes descritos, se puede decir que soldar aluminio es más complicado que, por ejemplo, soldar acero, debido a su mayor conductividad térmica y eléctrica; mayor coeficiente de expansión térmica, y su tendencia a formar una capa de aluminio refractaria. Asimismo, el hidrógeno tiene un efecto distinto en la soldadura de aluminio, la porosidad de la soldadura en la zona fundida se debe a la alta solubilidad del hidrógeno en el aluminio [17]. Se registran también otros inconvenientes, como la posibilidad de fisuración en caliente, entre otros.

### **1.2.2. Procesos no convencionales**

A continuación, se describirán los procesos de soldadura no convencionales más utilizados en la unión del aluminio y sus aleaciones:

a) Proceso PAW

Proceso similar al proceso de soldadura GTAW, con la diferencia que este es aplicado en aplicaciones más especializadas, ya que provee una mayor concentración de energía y el arco es de forma columnar rígida, lo cual permite una mayor velocidad de trabajo logrando penetración completa en una pasada, este proceso es muy usado en aplicaciones tales como la soldadura de tuberías de acero inoxidable y de bajos espesores. La soldadura por arco de plasma permite la automatización, pudiendo aplicarse en toda posición de trabajo. Sin

embargo, las limitaciones de este proceso van por el tema económico, siendo el costo de mantenimiento de equipos elevado y complicado de realizar.

b) Soldadura por puntos

Es utilizada para soldar aluminio de mediano espesor en la industria automotriz y aeroespacial; sin embargo, tiene el inconveniente de tener un alto costo inicial, por lo que está destinada a empresas que trabajen con tasas de productividad elevadas.

c) Soldadura por haz laser

Es un proceso para obtener soldadura con buenas relaciones de aspecto profundidad/anchura, con muy alta calidad, muy buena precisión y mínima distorsión. Proceso de alto costo y también reservado a empresas que tengan altas tasas de productividad con mínimos tiempos muertos.

d) Soldadura por fricción batido

Es uno de los procesos no convencionales más usados en la actualidad, desarrollado para la unión de aleaciones de aluminio que no eran fácilmente soldables por los procesos de unión convencionales antes descrito. Es una tecnología “verde” debido a su eficiencia, y no emana humos, gases tóxicos ni perjudiciales al medio ambiente.

e) Otros procesos

Procesos de soldadura tales como soldadura por ultrasonido o por explosión están direccionados para aplicaciones de unión puntuales del aluminio y sus aleaciones.

### **1.3. Soldadura por fricción batido (FSW)**

Conocido como FSW, del inglés *Friction Stir Welding*, es un proceso de soldadura en estado sólido, desarrollado, probado experimentalmente y patentado en 1991 por *The Welding Institute (TWI)* en Reino Unido. Fue desarrollado para unir aleaciones de aluminio que eran difíciles de soldar bajo procesos convencionales

de soldadura por fusión. Asimismo, es un proceso que consume menos energía, no produce humos tóxicos, no necesita gas de protección ni material de aporte, por lo que se le considera un proceso eficiente y amigable con el medio ambiente.

Durante la soldadura por fricción batido, una herramienta rotatoria no consumible con un diseño especial (pin-hombro) para la aplicación en específico, es insertada en la junta a soldar y va avanzando a lo largo de la línea de unión de dos placas de material base. Estos dos movimientos (rotación y avance) tienen dos funciones principales: el calentamiento por fricción de las placas de material base que genera la deformación plástica y el batido de material para producir la junta.

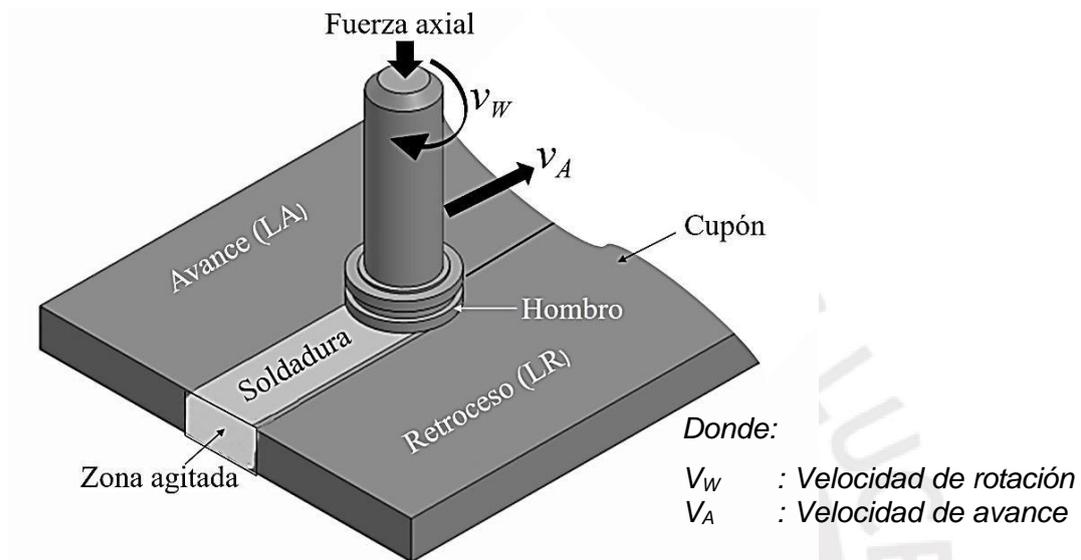
En la soldadura por fricción batido, dos parámetros principales gobiernan la cantidad de energía aportada así como la sanidad de la junta; estos parámetros son la velocidad de avance o también llamada velocidad de soldadura ( $v_A$ ) y la velocidad de rotación ( $v_W$ ) de la herramienta [6]. Asimismo, estos dos parámetros definen el lado de avance (LA) y lado de retroceso (LR) del proceso de soldadura por fricción batido.

Evik et al. (2016) investigó el efecto de la velocidad de avance en las propiedades mecánicas y la aparición de defectos en la soldadura por fricción batido de la aleación de aluminio AA7075, en donde mostró que el tamaño de grano promedio en la zona de batido se redujo con un incremento en la velocidad de avance; y se logró una eficiencia de junta del 64% a una velocidad de avance de 40 mm/min [18].

La Figura 1 muestra el esquema básico del proceso de soldadura por fricción batido, con sus principales parámetros.

Otros parámetros auxiliares como la herramienta y su geometría, tratamiento térmico del metal base previo al proceso de soldadura, ángulo de inclinación de la herramienta y fuerza vertical son también de importancia para realizar una buena soldadura. Sha et al. investigaron el efecto del ángulo de inclinación de la

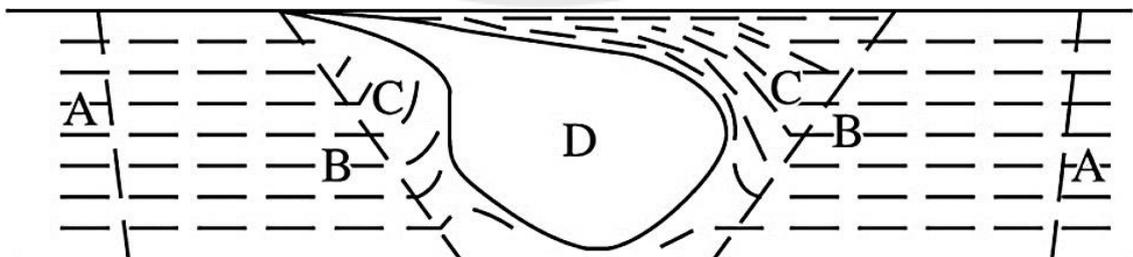
herramienta en el FSW del aluminio AA7075 T651, y observaron que con un ángulo de inclinación de la herramienta de 2° se logra una eficiencia de junta del 68%, y que con dicho ángulo las muestras tienen un comportamiento de fractura dúctil [19].



**Figura 1. Proceso de soldadura por fricción batido.**

Fuente: [www.phase-trans.msm.cam.ac.uk](http://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk)

Producto de la interacción de los parámetros principales y auxiliares antes mencionados, se muestra la Figura 2, en donde se distinguen y definen las zonas principales en el proceso de soldadura por fricción batido.



**Figura 2. Zonas principales del proceso de soldadura por fricción batido.**

(A) MB, (B) ZAC, (C) ZTMA, (D) ZB.

Fuente: [www.phase-trans.msm.cam.ac.uk](http://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk)

a) Metal Base (MB)

Llamado también material base, es el que se encuentra alejado de la línea de soldadura y no ha sido deformado, ni está afectado por el calor en términos de microestructura o propiedades mecánicas.

b) Zona afectada por el calor (ZAC)

Es una zona característica de varios procesos de soldadura. Como indica su nombre, esta zona está afectada por el ciclo térmico, lo cual genera un cambio en la microestructura y/o las propiedades mecánicas. Sin embargo, esta zona no ha sido deformada plásticamente durante la soldadura.

c) Zona termo mecánicamente afectada (ZTMA)

En esta zona, el material ha sido afectado por el ciclo térmico y a su vez ha sido plásticamente deformado por la herramienta en el proceso de soldadura por fricción batido. Los granos en esta zona están deformados de manera direccionada hacia arriba, alrededor de la zona de batido. En el caso de aluminios, generalmente existe un límite distinto entre la zona recristalizada y la zona aquí expuesta.

d) Zona de batido (ZB)

Llamado también *nugget*, es la zona que experimenta la deformación de forma más severa como consecuencia de la herramienta giratoria. Esta zona experimenta la recristalización dinámica y se puede observar una microestructura de granos finos y equiaxiales.

Investigaciones previas demuestran que este proceso de soldadura provee mejores propiedades mecánicas en la junta que otros procesos convencionales de soldadura.

Se han realizado diversos estudios en donde se analizaron y compararon los procesos GMAW, GTAW y el proceso de soldadura por fricción batido (FSW) y se observó que en el último mencionado se obtienen mejores propiedades

mecánicas, seguido de las uniones realizadas por el proceso GTAW y GMAW (se obtuvo una eficiencia de junta en uniones de aluminio AA5052 de 6 mm del 65% mediante FSW, comparado con 45% - GMAW y 55 -%GTAW) así como juntas sin defectos, comparadas con los otros dos procesos en los que sí se encontraron ciertos defectos (porosidades) en la microestructura y que son la posible causa de la disminución de las propiedades mecánicas. Ensayos de doblez fueron también realizados y no se obtuvieron defectos de importancia [20]. En otra investigación se evaluó también diferencia en las propiedades mecánicas y microestructura de juntas de aluminio AA5083- H321 de 4.5 mm de espesor al soldarlas por fricción batido, GMAW a doble cara y GTAW [21]. Se obtuvo valores de eficiencia de juntas iguales (81%) en los procesos GTAW y por fricción batido. Sin embargo, algo común en estas investigaciones es la presencia de porosidades en los procesos por fusión convencionales, lo que no ocurre en las juntas soldadas por fricción batido.

La ventaja económica del proceso también se hace visible frente a otros procesos de soldadura. Una investigación [22] se realizó para evaluar costos entre el proceso GMAW y el proceso de soldadura por fricción batido en la unión de perfiles de aluminio, se hizo comparación de costos en tiempo de producción, inversión de máquinas, consumibles y costos de herramientas. Aunque en un principio se pudo observar y analizar que en el proceso GMAW se obtenía menos costos, se observó que en grandes lotes de material para trabajo el proceso de soldadura por fricción batido es mucho más económico.

#### **1.4. Mejoras en el proceso de soldadura por fricción batido**

Desde el descubrimiento del proceso de soldadura por fricción batido, numerosas mejoras y modificaciones al proceso han sido probadas y obtenidas: El uso del precalentamiento en la soldadura de ciertas series de aluminio, el uso de herramientas optimizadas y con diferentes configuraciones (en tándem por ejemplo, para espesores considerables), hasta el proceso con refrigeración asistida, entre los que destaca la variación del proceso realizada bajo agua, bajo líquido refrigerante o hasta bajo nitrógeno líquido.

Cabe resaltar que, en cada variación del proceso convencional de soldadura por fricción batido, se realizan nuevos análisis de parámetros de soldadura, de diseños de herramientas, comparaciones y discusiones de los efectos que cada uno de los mencionados genera en la microestructura y las propiedades mecánicas de la junta soldada. A continuación, se comentan algunas investigaciones previas realizadas.

Se ha investigado la influencia de la velocidad de desplazamiento de la herramienta sobre las propiedades de tracción de las juntas soldadas por fricción batido bajo agua de juntas de aleación de aluminio de alta resistencia, se encontró que la unión realizada con una velocidad de desplazamiento de herramienta de 30 mm/min mostró propiedades de tracción superiores (342 MPa) con una eficiencia de junta del 76%, mayor a la obtenida con velocidades de 20 mm/min y 25 mm/min. Esto podría atribuirse a la menor generación de calor, lo cual genera un menor tamaño de grano que en consecuencia aumenta la superficie del límite de grano y la disminución del ancho de la ZTMA [9].

Se realizó el proceso de soldadura por fricción batido bajo agua para unir dos placas de aleación de aluminio AA5083, y muestra que el medio refrigerante afecta considerablemente la historia térmica; la cual fue analizada por el método de elementos finitos; así como la microestructura y las propiedades mecánicas de la unión soldada. Asimismo indica que es crucial controlar la velocidad de rotación y de avance en el proceso para obtener buenas propiedades en la junta[10].

Se realizó una investigación para evaluar el efecto de los parámetros de soldadura en las propiedades mecánicas y las características microestructurales durante el proceso de soldadura por fricción batido de la serie de aluminio AA7075-T6 sujeto a un sistema de calentamiento por gas como una fuente de precalentamiento durante el proceso de soldadura. Se concluye que emplear un sistema de calentamiento reduce la formación de defectos en el proceso de soldadura cuando se usan bajos parámetros de soldadura, lo que genera una

mayor resistencia mecánica de la junta, asimismo la selección de los parámetros adecuados es de vital importancia para obtener juntas sanas y sin defectos [23].

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Preparación del metal base

En el presente trabajo se utilizaron placas de aluminio AA5052-H32 de 3 mm de espesor, en medidas de 100 mm x 50 mm cada una, las cuales fueron habilitadas por corte mecánico en una cizalla, para evitar deformaciones y variaciones en la microestructura. Se habilitaron las placas necesarias para realizar los experimentos de prueba hasta poder verificar la sanidad de las juntas, en aire y en líquido refrigerante.

### 2.2. Preparación de la herramienta

Se usó una herramienta de perfil cónico, fabricada en acero de herramienta BOHLER K340 (equivalente X110CrMoV82 en norma DIN) y endurecida por tratamiento térmico de temple y revenido. Las especificaciones y características de la herramienta se muestran en la Tabla 6. La herramienta fabricada se muestra en la Figura 3.

**Tabla 6. Especificaciones de la herramienta a usar en los experimentos**

<b>Longitud de la herramienta (total)</b>	85 mm
<b>Diámetro del hombro</b>	12 mm
<b>Perfil del pin</b>	Cónico
<b>Diámetro del pin</b>	Mayor: 4 mm, Menor: 3mm
<b>Longitud del pin</b>	3 mm
<b>Ángulo de inclinación</b>	0 grados
<b>Material y dureza</b>	Acero K340 BOHLER, 55-60 HRC

### 2.3. Montaje de placas de aluminio

La forma de montaje de las placas de aluminio AA5052-H32 usadas en el presente trabajo de investigación fue realizada de diferente manera para cada caso, en el caso de las soldaduras realizadas por fricción batido de forma

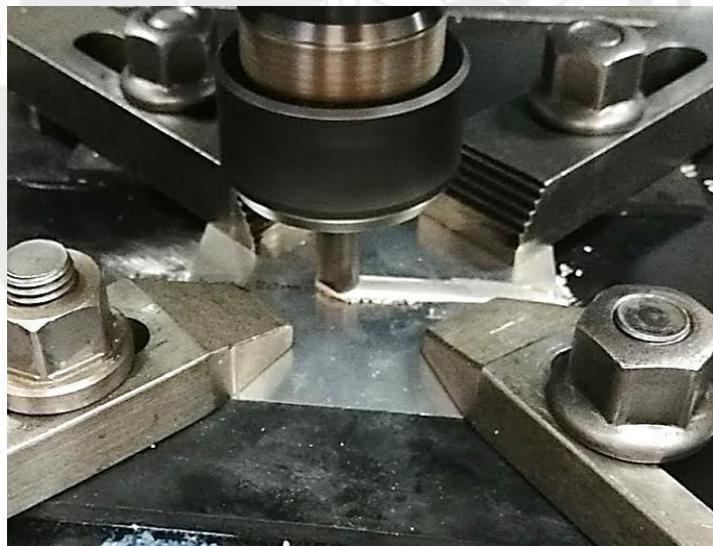
convencional y en el caso de las realizadas bajo alimentación continua de líquido refrigerante.



**Figura 3. Herramientas fabricadas empleadas**

### **2.3.1. Soldadura por fricción batido convencional**

En el caso de las soldaduras realizadas de forma convencional (medio refrigerante aire) se ajustaron las placas con dispositivos de fijación propios de la máquina y con una placa de acero inoxidable como respaldo de las mismas. El montaje del proceso mencionado se muestra en la Figura 4.



**Figura 4. Fijación de placas para soldaduras en aire**

### **2.3.2. Soldadura por fricción batido bajo alimentación continua de líquido refrigerante**

En el caso de las soldaduras realizadas bajo alimentación continua de líquido refrigerante, se colocó topes en los extremos de las placas a unir, y como primer

paso se alimentó con dicho líquido hasta la superficie superior de las mismas y luego de forma continua y en la ubicación de la junta, para prevenir la pérdida de dicho fluido. El montaje del proceso mencionado se muestra en la Figura 5.



**Figura 5. Fijación de placas para soldaduras realizadas bajo alimentación continua de líquido refrigerante**

El líquido refrigerante que se usó en los experimentos fue el aceite emulsionable Muturrol, de la marca Vistony, compuesto de una proporción 10:1, en donde la mayor proporción corresponde al agua destilada, y la menor al aceite.

## **2.4. Parámetros de soldadura**

### **2.4.1. Ensayos iniciales**

Una vez fijadas las placas de acuerdo al punto anterior, se definieron los parámetros de soldadura. El objetivo fue obtener juntas en donde se debe tener continuidad en la unión y cero defectos, por lo cual estos parámetros deben tener una proporción determinada entre la velocidad de rotación y la velocidad de avance [24] y [25]. El primer grupo, realizado a 600 rpm se efectuó solamente en aire, y se usa como base para determinar los parámetros siguientes. Se genera un grupo más de cupones soldados con alimentación continua de líquido refrigerante, empleando 1500 rpm y 1700 rpm, debido a que requiere mayor aporte de calor, para compensar la mayor pérdida que este medio genera al tener mayor capacidad de disipación. De acuerdo a lo mencionado se genera la Tabla 7, donde se muestran los parámetros usados:

**Tabla 7. Parámetros usados en las diversas uniones y cantidad de experimentos.**

	600 rpm	1000 rpm	1200 rpm	1500 rpm	1700 rpm
80 mm/min	A	A / L	A / L	L	L
100 mm/min	A	A / L	A / L	L	L
120 mm/min	A	A / L	A / L	L	L

A: Soldadura realizada de forma convencional, al aire.

L: Soldadura realizada con alimentación continua de líquido refrigerante.

Las uniones se realizaron de forma convencional y bajo alimentación continua de líquido refrigerante, en la máquina fresadora CNC marca MAZAK modelo VTC-16B del Laboratorio de Manufactura de la Sección Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

## **2.5. Inspección y ensayos a realizar**

### **2.5.1. Caracterización del metal base**

Se caracterizó al metal base, el aluminio AA5052-H32, realizando análisis químico, análisis metalográfico, ensayo de dureza y ensayo de tracción.

### **2.5.2. Inspección inicial de experimentos realizados**

Después del proceso de soldadura, se realizó una inspección visual para identificar defectos en la superficie y propios del proceso, obteniendo resultados en un primer filtro. Posteriormente se realizó examinación radiográfica a los cupones obtenidos del primer filtro, para verificar la sanidad de la junta e identificar posibles defectos internos.

#### **2.5.2.1. Inspección visual**

Se inspeccionaron visualmente las juntas obtenidas a los diversos parámetros de soldadura seleccionados, y se observó la influencia de los parámetros en el aspecto superficial y características de la junta soldada. Las juntas soldadas que no pasaron la inspección visual fueron descartadas. Se tuvo en cuenta los criterios de aceptación básicos y los del código AWS D1.2. (*Structural Welding Code – Aluminum*).

### **2.5.2.2. Examinación radiográfica**

Se realizó el ensayo de radiografía industrial a los cupones visualmente aceptables y se utilizó el código AWS D1.2. para evaluar las posibles discontinuidades y/o defectos que puedan aparecer en la junta soldada. Se seleccionaron los cupones sin defectos para realizar el análisis metalográfico y los ensayos mecánicos.

Una vez identificados los cupones que presentan juntas sanas, se cortaron y mecanizaron las probetas requeridas para la caracterización microscópica y para los diferentes ensayos mecánicos de acuerdo a las normas correspondientes. Se extrajeron 04 probetas en total: 03 para ensayo de tracción y 01 para análisis de microscopía y barrido de durezas. La distribución de las probetas en el cupón soldado se muestra en la Figura 6.

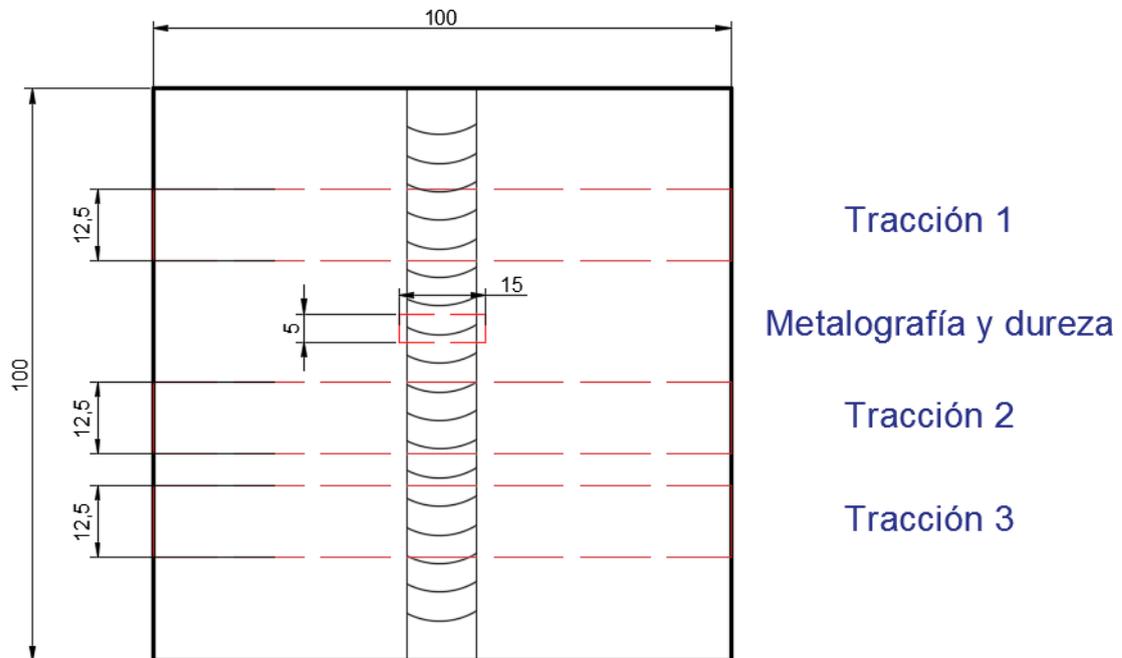
Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Materiales de la Sección Ingeniería Mecánica y en el Centro de Caracterización de Materiales (CAM) de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

### **2.5.3. Análisis metalográfico**

La norma ASTM E407-07 (*Standard practice for microetching metals and alloys*) para realizar procedimientos metalográficos fue usada para preparar las probetas y realizar el análisis correspondiente para la serie de aluminio empleado en el presente trabajo. Las muestras fueron pulidas y atacadas electroquímicamente con el reactivo Barker, compuesto por: 5g de  $\text{HBF}_4$  y 200 mL de agua destilada; y se usó un cátodo de plomo en la reacción electrolítica para atacar y revelar la superficie transversal soldada. Las muestras fueron procesadas en el equipo de ataque electroquímico marca Struers modelo MoviPol, a 20 voltios y 60 segundos de ataque, y fueron examinadas a través del microscopio metalográfico óptico marca LEICA modelo DMI500M c/rango óptico: 50-1000X.

Las muestras extraídas tuvieron la siguiente medida: 20 mm x 5 mm x 3 mm y fueron posteriormente briqueteadas.

Las muestras del metal base y de las soldaduras se briquetearon de acuerdo al procedimiento de laboratorio en la máquina Buehler Simplemet Mounting Press, para poder realizar correctamente la microscopía y la medición de durezas.



**Figura 6. Configuración de la junta y diagrama de extracción de probetas.**

#### **2.5.4. Ensayo de dureza**

Para el ensayo de dureza fueron empleadas las mismas muestras que se usaron para el análisis metalográfico. Se realizaron pruebas de microdureza Vickers en la máquina de dureza marca Zwick/Roell modelo Indente ZHV para determinar valores de dureza en la zona central de las probetas obtenidas de la sección transversal de las diferentes uniones realizadas. Se aplicó una carga de 5 N durante 10 segundos según la norma ASTM E384-16 (Standard test method for microindentation hardness of materials) en las regiones seleccionadas de la sección de la junta soldada.

#### **2.5.5. Ensayo de tracción**

Las probetas de tracción (03 en total, por cada cupón sano y sin defectos obtenido), fueron cortadas perpendicularmente a la dirección de soldadura de la

junta y el ancho medido en base a la sección reducida (12.5 mm) con la longitud total del cupón (100 mm).

La preparación para el procedimiento de ensayo y el ensayo en sí se realizó con las directrices de la norma ASTM E8M-16a (*Standard test methods for tension testing of metallic materials*). Las probetas fueron ensayadas en la máquina de tracción Zwick/Roell modelo Z050 a una velocidad de ensayo de 0.6 mm/min.

### **2.5.6. Análisis de la superficie de fractura**

Se empleó microscopía electrónica de barrido (SEM) y se usó el microscopio marca FEI modelo Quanta 650, propiedad del Centro de Caracterización de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú (CAM-PUCP) para estudiar las superficies de fractura obtenidas luego del ensayo de tracción.

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.1. Caracterización del metal base**

Se muestra en la tabla 8 los resultados del análisis químico realizado al metal base; se aprecia que la composición química que presenta la aleación de aluminio indica que corresponde la del aluminio AA5052.

**Tabla 8. Análisis químico metal base.**

<b>Elemento Químico</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Cr</b>	<b>Al</b>
<b>Contenido (%)</b>	0.07	0.28	0.01	0.06	2.31	0.26	97

De la micrografía realizada al material base (Figura 7), se puede observar granos de forma alargada y orientados en la dirección del laminado, lo que demuestra que ha sufrido deformación en frío para alcanzar el estado H32. Se aprecian también los precipitados de magnesio, característicos de la aleación de aluminio en estudio.



**Figura 7. Micrografía óptica del metal base.**

La Tabla 9, muestra los resultados del ensayo de dureza y de tracción realizados al metal base.

**Tabla 9. Ensayo de tracción y dureza al metal base.**

<b><i>Esfuerzo de Fluencia (0.2%) [MPa] (promedio)</i></b>	<b><i>Resistencia a la tracción [MPa] (promedio)</i></b>	<b><i>Elongación en 40mm de longitud calibrada (%) (promedio)</i></b>	<b><i>Valor de dureza (promedio)</i></b>
193.3	238.6	12	68 HV

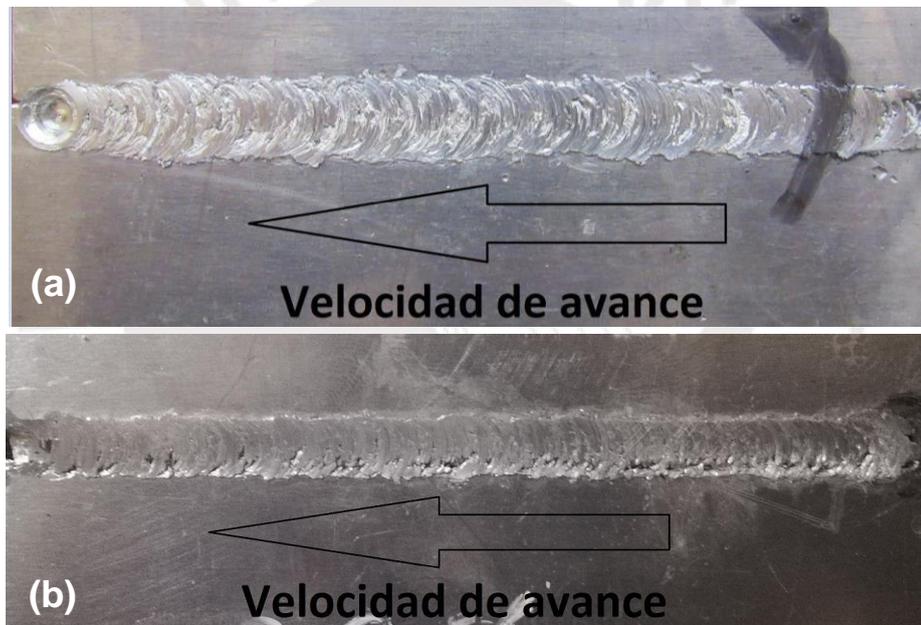
Los valores de las propiedades mecánicas obtenidas, indican que éstas corresponden con los valores presentados en la Tabla 5.

### **3.2. Inspección inicial de experimentos realizados**

A continuación, se detalla los resultados obtenidos en la inspección visual y examinación radiográfica a las juntas soldadas, y se analiza la influencia de la variación de las velocidades de rotación y avance.

### 3.2.1. Inspección Visual y efecto de la variación de las velocidades de rotación y avance

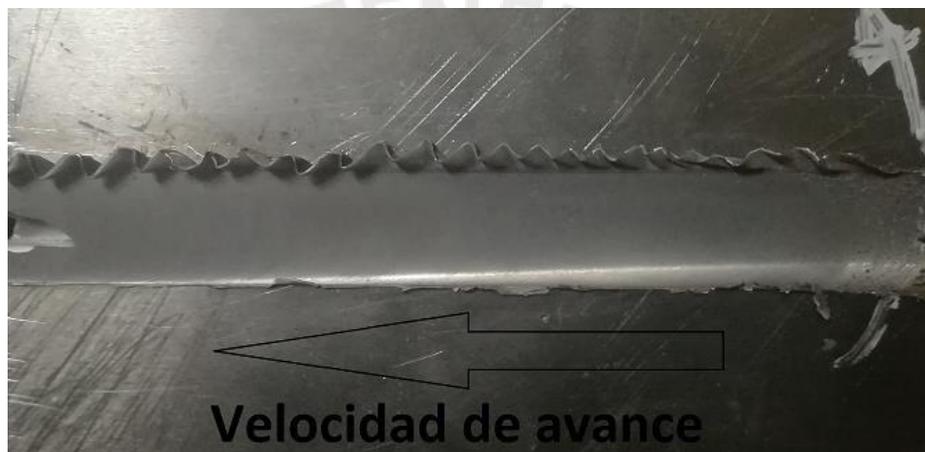
Los experimentos se realizaron de forma gradual, desde los menores valores de velocidades de avance y de rotación hasta los mayores valores. Se observó que a menores velocidades de rotación, la superficie exterior de la soldadura realizada es pobre en acabado, con superficie irregular, exhibiendo mordeduras y faltas de llenados en varios puntos a lo largo de la línea de unión. Esto se cumple en ambos casos, tanto para las soldaduras realizadas en aire como en líquido refrigerante. Los resultados se muestran en la Figura 8.



**Figura 8. Acabado de soldaduras realizadas a baja velocidad de rotación: (a) Junta en aire (600 rpm – 60 mm/min), (b) Junta bajo alimentación continua de refrigerante (1000 rpm – 120 mm/min).**

Por otro lado, cuando las soldaduras se realizan a velocidades de rotación elevadas, se observa un exceso de batido del material, apreciándose un abultamiento de material batido en uno de los lados. Esto se produce solamente en las soldaduras realizadas convencionalmente en aire. Este efecto se puede apreciar en la Figura 9.

El efecto de la variación en la velocidad de rotación es acorde con lo que mencionan Podržaj et. al (2015) respecto a la combinación de valores de velocidad de rotación y avance, y su efecto en el acabado de la soldadura por fricción batido. Un exceso de calor (altos valores de velocidad de rotación) genera desplazamientos de material hacia fuera de la línea de soldadura, y una falta de aporte de calor (bajos valores de velocidad de rotación) genera cavidades y faltas de llenado en la línea de soldadura. [26].

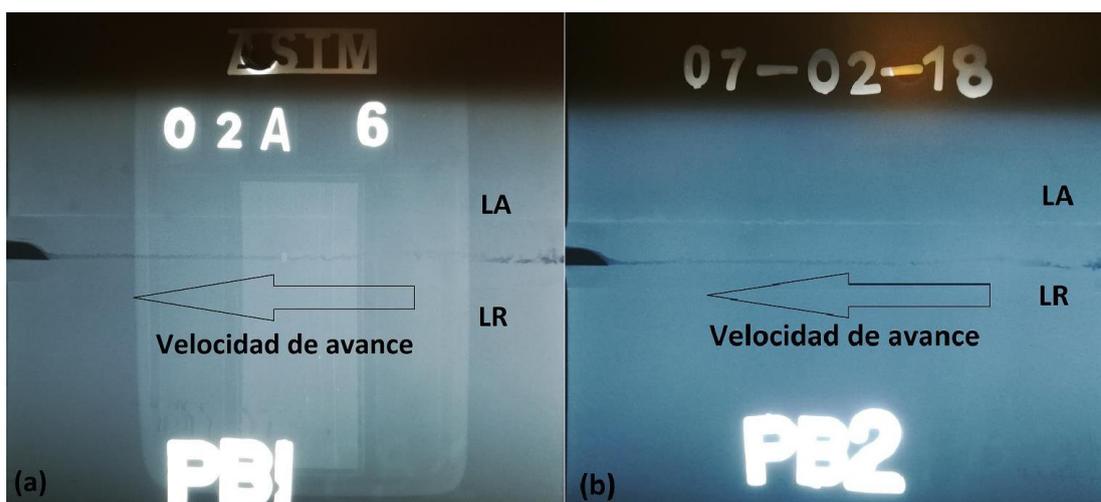


**Figura 9. Acabado de soldaduras realizadas a alta velocidad de rotación (1200 rpm – 100 mm/min), realizada en aire.**

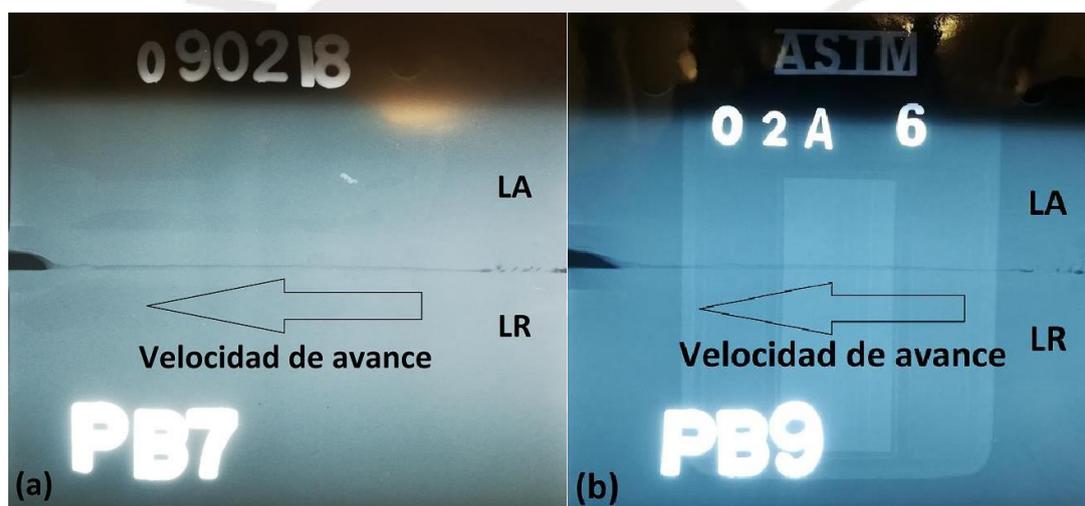
### **3.2.2. Examinación Radiográfica**

Realizada la inspección visual y el primer filtro de cupones con junta sana, se procedió con la examinación radiográfica de los cupones que presentaban buen acabado superficial en la línea de soldadura.

Una cantidad considerable de cupones presentaba una línea oscura a lo largo de la soldadura realizada, tanto en aire como las realizadas bajo alimentación continua de refrigerante, lo que indicaba una falta de llenado en la unión. Esto se muestra en las Figuras 10 y 11.



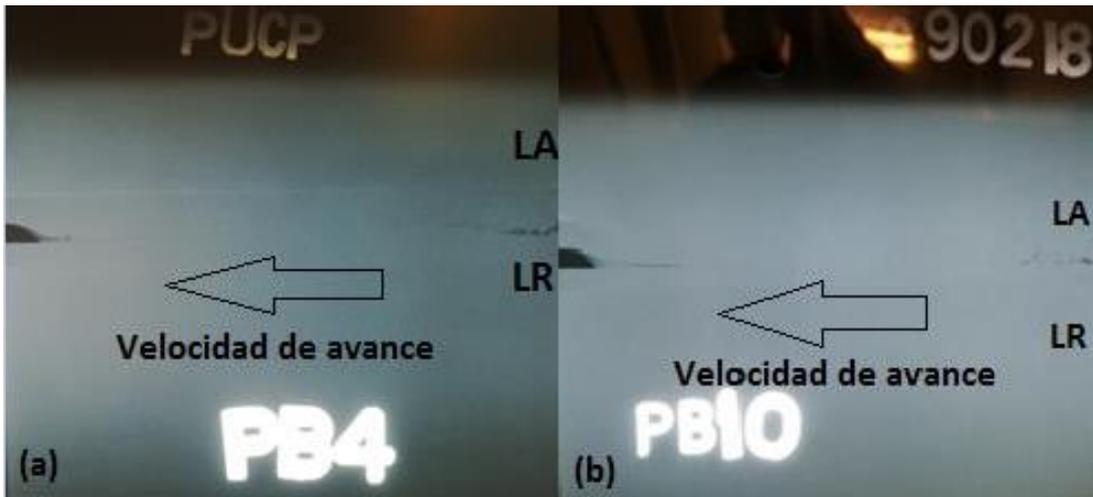
**Figura 10. Fotografías de la examinación radiográfica realizada a las juntas de buen acabado superficial: (a) 1000rpm – 80mm/min, (b) 1000rpm – 120mm/min, juntas soldadas de forma convencional (aire)**



**Figura 11. Fotografías de la examinación radiográfica realizada a las juntas de buen acabado superficial: (a) 1500rpm – 100mm/min, (b) 1700rpm – 100 mm/min. Juntas soldadas bajo alimentación continua de refrigerante.**

Se muestra en la Figura 12 que, de las uniones realizadas, son dos combinaciones de parámetros que ofrecen una junta sana en casi toda su longitud:

- Aire : A 1000rpm y 100mm/min
- Bajo alimentación continua de refrigerante: A 1700rpm y 80mm/min



**Figura 12. Fotografías de las juntas sanas luego de la examinación radiográfica: (a) 1000rpm – 100mm/min (convencional), (b) 1700rpm – 80mm/min (bajo alimentación continua de refrigerante).**

Cabe resaltar que, en todos los cupones realizados, en ambas atmósferas refrigerantes, se aprecia que al final de la unión se presenta un vacío o hueco que se produce por una falta de tiempo de batido y la no extracción vertical de la herramienta.

### 3.2.3. Obtención de parámetros y probetas para ensayo

De los experimentos realizados, se generó la Tabla 10, que es un resumen de los resultados obtenidos.

**Tabla 10. Resumen de resultados obtenidos.**

	600 rpm	1000 rpm	1200 rpm	1500 rpm	1700 rpm
80 mm/min	X	X	X	X	O
100 mm/min	X	O	X	X	X
120 mm/min	X	X	X	X	X

Dónde: X: Soldadura defectuosa (falta de llenado). O: Soldadura sana y sin defectos

Respecto a la combinación de valores utilizados en la unión por fricción batido en aire, hay estudios que sustentan lo obtenido, parámetros de 950rpm y 100mm/min resultan en una eficiencia de junta del 87%. [23].

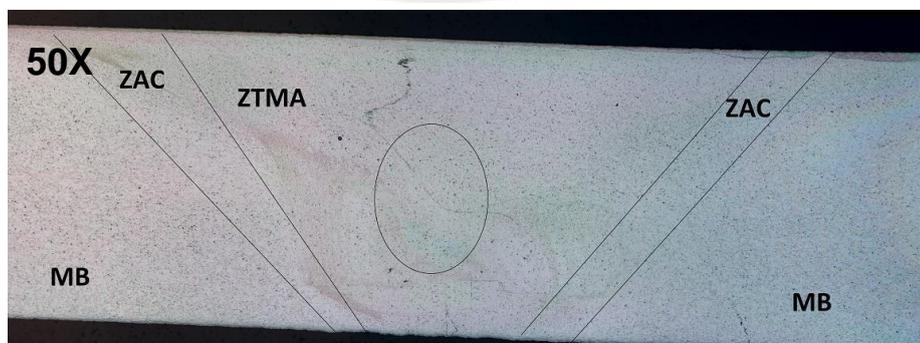
Sin embargo, respecto a los experimentos bajo alimentación continua de refrigerante los resultados son mas bien dispersos.

La geometría de la herramienta es también un factor de igual influencia en la sanidad de la junta.

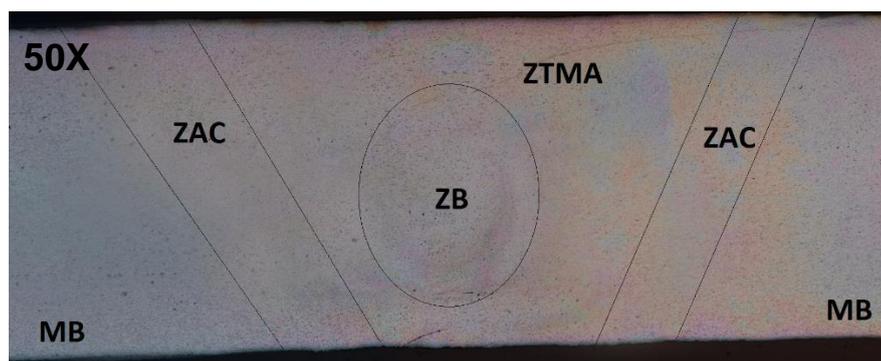
Como se puede ver, la calidad de la junta en el proceso de soldadura por fricción batido, en general, es principalmente dependiente de la generación de calor y el flujo de material que resulte de ello. Respecto a la generación de calor se distinguen tres estados: estado de calor insuficiente, estado de calor balanceado y estado de calor excesivo. Respecto al material se distinguen igualmente: Estado de flujo de material insuficiente, balanceado y excesivo. Por lo que regulando la generación de calor se puede alcanzar un estado balanceado, investigaciones sugieren que la velocidad de soldadura (o de avance) influye de manera principal en la generación de calor y flujo de material [9].

### 3.3. Análisis Metalográfico

La Figura 13 muestra la macrografía de la soldadura realizada por fricción batido de forma convencional empleando una velocidad de rotación de 1000rpm y una velocidad de avance de 100mm/min; y de la realizada bajo alimentación continua de líquido refrigerante empleando una velocidad de rotación de 1700 rpm y una velocidad de avance de 80 mm/min (Figura 14), así como el aumento de las zonas características de la junta soldada de las macrografías obtenidas.



**Figura 13. Macrografía de junta soldada de forma convencional.**



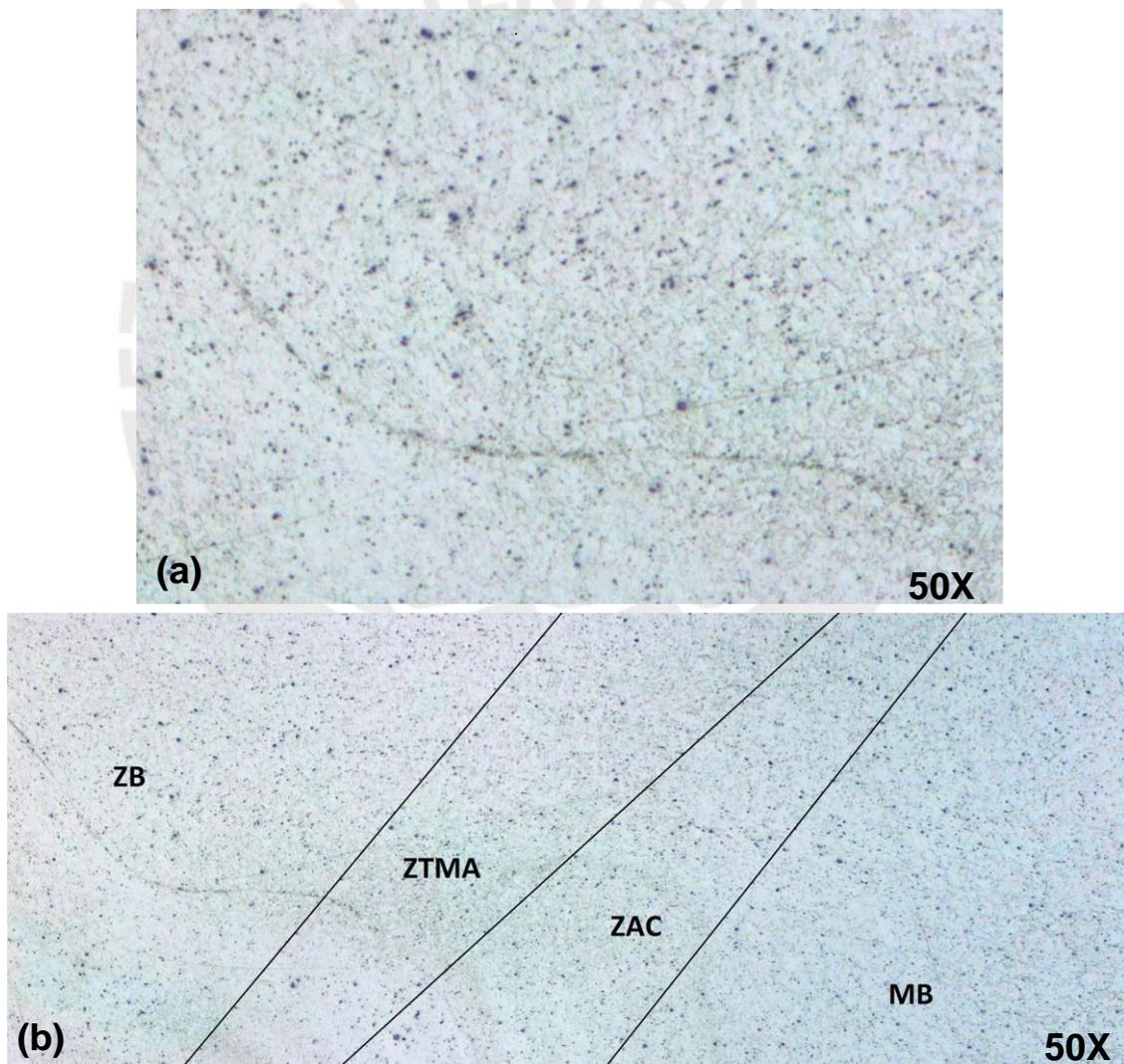
**Figura 14. Macrografía de junta soldada bajo alimentación continua de líquido refrigerante.**

De las Figuras mostradas, se aprecia que en la soldadura por fricción batido bajo alimentación continua de líquido refrigerante genera cambios considerables en la microestructura. La principal diferencia entre la microestructura del material base y la zona de batido, es el tamaño de grano. Como se observó en el punto 4.1, en el metal base se observan granos de forma alargada y orientadas en el sentido de laminación, mientras que en la zona de batido son más pequeñas y menos alargados.

Se observa que, en las zonas de batido, los granos son finos y equiaxiales comparados con el material base, independientemente del tipo de soldadura realizada, como se indica en la Figura 15a y en la Figura 16a. Haciendo la comparación visual de los tamaños de grano en las tres muestras se determina que el menor tamaño se obtiene de la junta soldada bajo alimentación continua de líquido refrigerante, y el mayor es del observado del metal base, como se muestra en la Figura 7. Esto se debe a la mayor capacidad de disipación de calor por parte del líquido refrigerante, que es lo que rápidamente transmite el calor por convección a través de las regiones características de la junta soldada, por lo que el calor disponible en este proceso es menor en la junta soldada por fricción batido de forma convencional (aire), en el cual la pérdida de calor por el enfriamiento al contacto con el aire es mínimo, lo que genera zonas características más anchas y con granos de mayor tamaño. Investigaciones soportan lo anterior al haber realizado mediciones promedio del tamaño de grano [8], [9], [25], las cuales tienen menores valores que los del metal base, y en

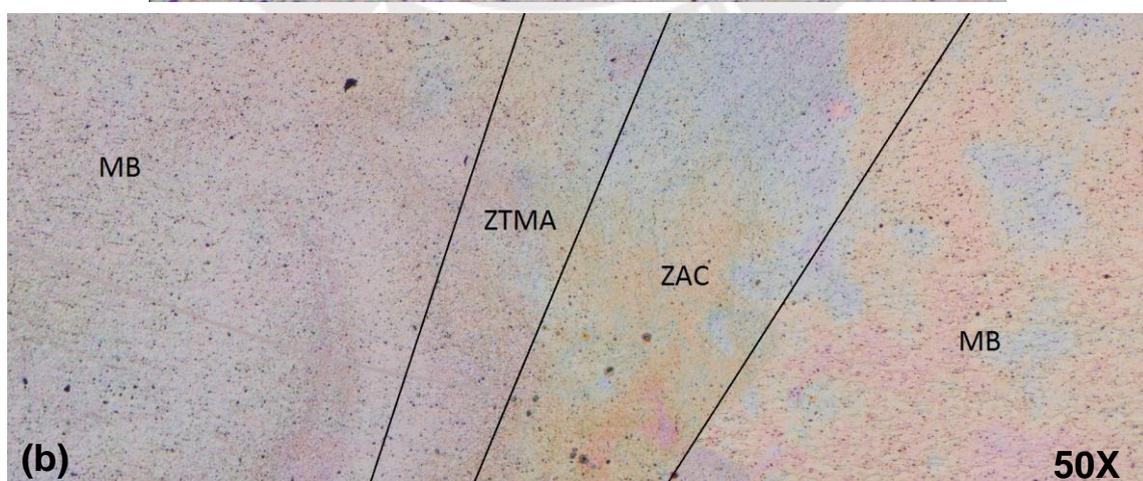
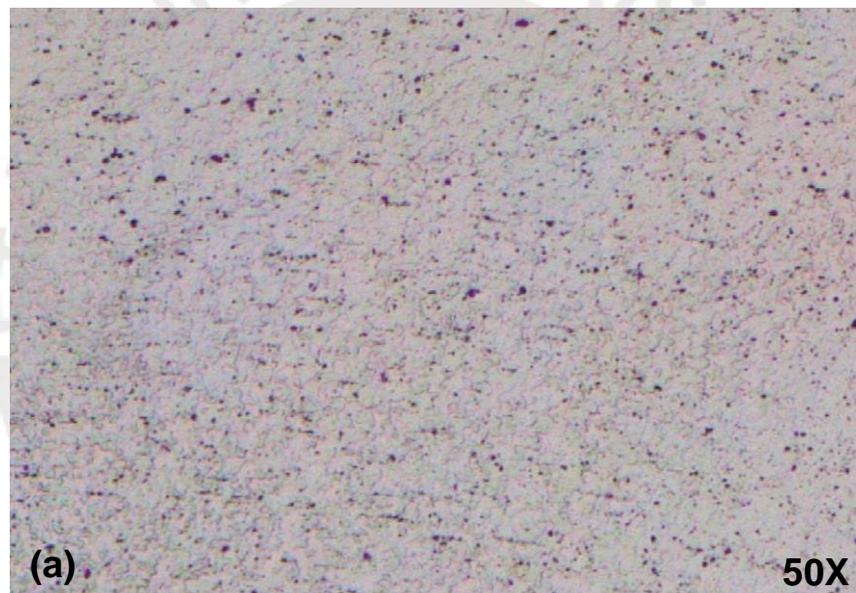
algunos casos, de hasta la tercera parte (en la zona de batido) y de hasta 40% (en otras zonas características de la junta) de las obtenidas al soldar por fricción batido de forma convencional.

En ambos procesos, la zona de batido está caracterizada por la presencia de granos recristalizados, lo cual se genera por la deformación severa y el alto grado de tasa de calor a la que esta zona está sometida (siendo menor en la soldada por fricción batido bajo alimentación continua de líquido refrigerante), hechos que promueven el proceso de recristalización.



**Figura 15. (a) Zona batida. Junta soldada por fricción batido de forma convencional y (b) Detalle de zonas características.**

Sin embargo, en la ZTMA, el efecto es distinto, se observa granos más bien alargados y de cierta forma vertical, como muestra la Figura 15b y en la Figura 16b. Esto debe a la deformación y exposición térmica insuficiente, lo que impediría la recristalización, que es un fenómeno directamente dependiente de la generación de calor y la deformación plástica generada en el proceso de soldadura por fricción batido. En la ZAC, los granos exhiben un ensanchamiento sin deformación, debido al efecto de la exposición térmica solamente. Cabe resaltar que la ZTMA es más angosta en el caso de la junta soldada por fricción batido bajo alimentación continua de líquido refrigerante. Investigaciones previas respaldan lo mencionado [27], en donde la relación de variación es aproximada de 1:3.

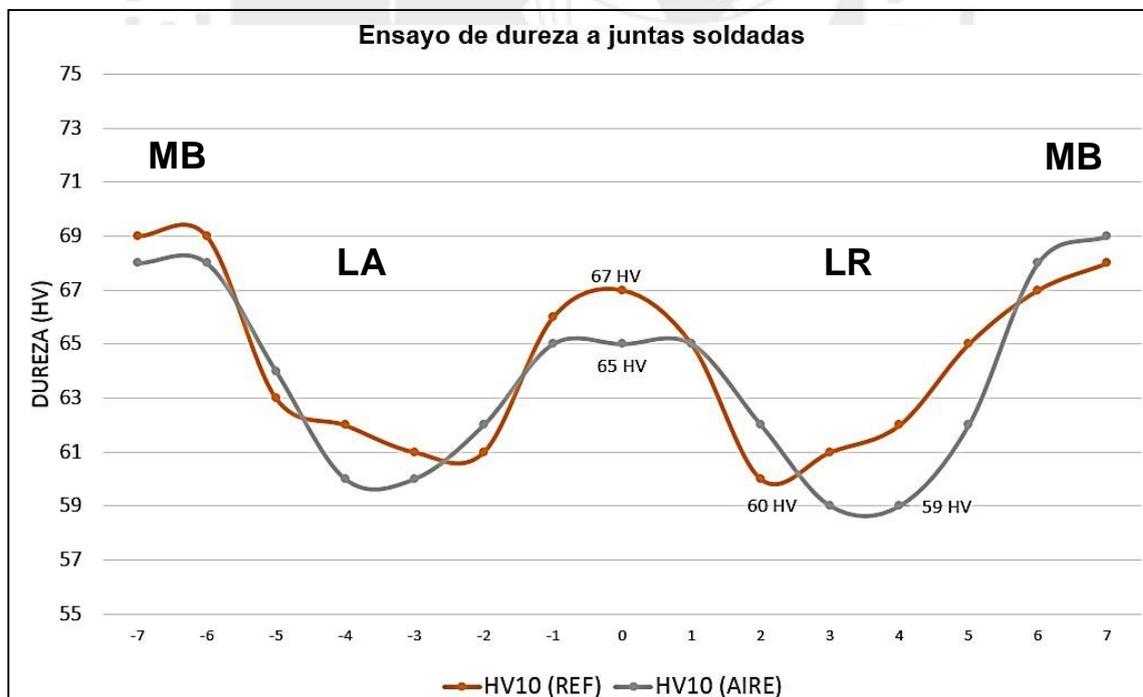


**Figura 16. (a) Zona batida. Junta soldada bajo alimentación continua de líquido refrigerante y (b) Detalle de zonas características.**

### 3.4. Ensayo de dureza

Se realizó el ensayo de dureza a las probetas extraídas de los experimentos en aire (1000rpm – 100mm/min) y bajo alimentación continua de líquido refrigerante (1700rpm – 80mm/min). Los resultados del ensayo de dureza se muestran en la Figura 17.

En ambas juntas soldadas se observa la configuración típica en forma de W, común a las soldaduras de aluminio. Asimismo, se observa que, en todas las zonas características, los valores de la dureza en la junta soldada bajo alimentación continua de líquido refrigerante son ligeramente mayores que los de la junta soldada en aire, lo que se puede atribuir al menor aporte de calor generado en la primera junta mencionada que en la segunda. Como se observa, el aporte de calor es el que prima en la variación de la resistencia y propiedades mecánicas de las juntas soldadas.



**Figura 17. Resultados obtenidos – Ensayo de dureza.**

Asimismo, se observa que el valor de la dureza en la zona de batido son las mayores de la junta soldada, en el caso de la soldada bajo alimentación continua de líquido refrigerante, lo cual puede ser una razón de la mejora en la resistencia a la tracción de la unión realizada. En el caso de la junta soldada de forma convencional, el valor de la dureza en la zona de batido es ligeramente menor que la obtenida del metal base.

En la junta realizada en aire se obtiene como menor valor de dureza 59 HV, el cual está ubicado en el lado reverso, mientras que en la junta realizada bajo alimentación continua de líquido refrigerante se registró un valor de 60 HV, también en el lado reverso. Se observa también que las zonas características de la soldadura son más anchas en la junta soldada en aire que en la bajo alimentación continua de líquido refrigerante.

Los mayores valores de dureza se obtienen, en ambos casos, en la zona de batido, siendo el valor registrado de 67 HV en la junta soldada bajo alimentación continua de líquido refrigerante y 65 HV en la junta soldada en aire.

Se sabe que las propiedades mecánicas de las juntas soldadas son dependientes de las características microestructurales de las diferentes zonas características. Esto lo define la relación de Hall-Petch. Esta relación define que la resistencia o dureza es inversamente proporcional al diámetro de grano promedio [28]. En base a esto se puede decir que en la zona termo mecánicamente afectada se exhiben mayores tamaños de grano, y por ende menor área de límite de grano. Por lo cual la menor dureza en la zona es atribuida a este fenómeno.

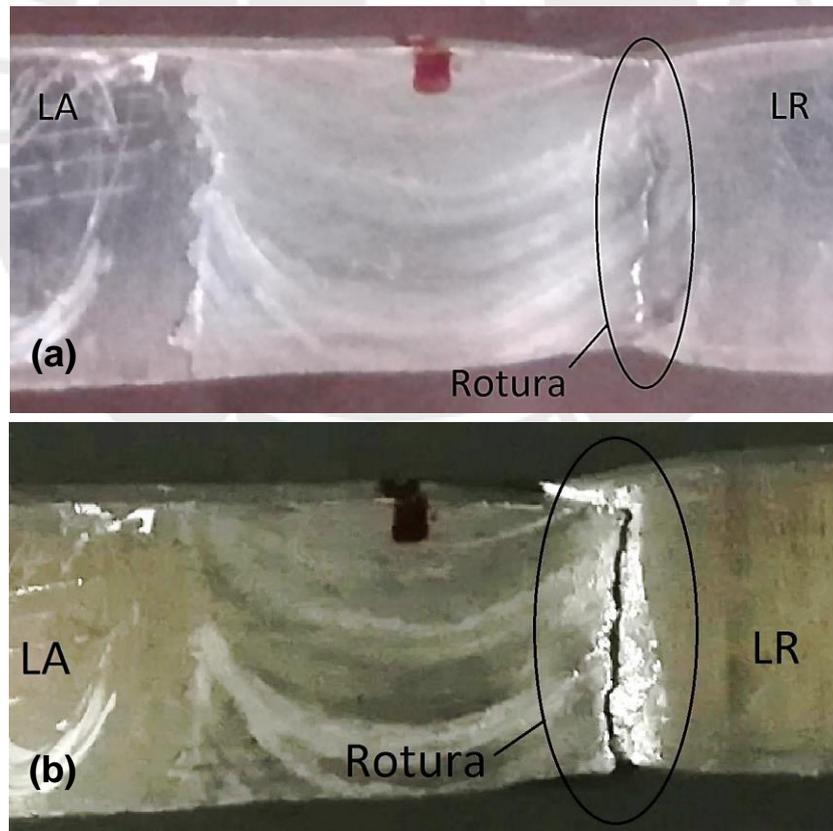
Por otro lado, en la zona de batido se exhiben los granos más finos, lo que genera mayor área de límite de grano, los cuales son las regiones de más alta energía y por lo tanto actúan como una barrera para el movimiento de dislocaciones.

### 3.5. Ensayo de tracción

Los valores obtenidos de las propiedades de tracción se promediaron y fueron comparados con el metal base. Los resultados se muestran en la Tabla 11. Cabe resaltar que todas las muestras soldadas rompieron en el lado de retroceso (LR), lo cual es la consecuencia de los menores valores de dureza obtenidos, que son justamente en dicho lado, esto se aprecia en la Figura 18.

**Tabla 11. Resumen de resultados obtenidos – Ensayo de tracción.**

	<b>Esfuerzo de Fluencia (0.2%) [MPa]</b>	<b>Resistencia a la tracción [MPa]</b>	<b>Elongación en 40mm (%)</b>	<b>Eficiencia de la junta</b>	<b>Ubicación de la fractura</b>
<b>Metal Base</b>	193.3	238.6	12	-	-
<b>Aire</b>	125.6	208.5	10	87.4	LR
<b>Refrigerante</b>	139.0	217.3	9	91.1	LR



**Figura 18. Zonas de rotura. (a) Soldadura por fricción batido convencional. (b) Soldadura por fricción batido bajo alimentación continua de líquido refrigerante**

Como se puede apreciar, el metal base tiene la resistencia a la tracción más elevada (238.6 MPa) comparada con las soldaduras por fricción batido realizadas en aire y bajo alimentación continua de refrigerante. Sin embargo, en la segunda se muestran mejores resultados, pues se obtuvo una resistencia de 217.3 MPa, lo cual resulta en una eficiencia de junta del 91.1% del metal base, contra la realizada en aire, la cual tuvo como resistencia un valor de 208.5MPa, resultando en una eficiencia del 87.4% del metal base.

Cabe resaltar que todos estos valores son igualmente satisfactorios según el código AWS D1.2, en dónde se especifica que las uniones soldadas deben tener una resistencia a la tracción mínima de 170 MPa para el aluminio usado en el presente trabajo.

Sin embargo, la ductilidad de la junta, reflejada en el porcentaje de elongación obtenido, disminuye en la junta realizada por fricción batido bajo alimentación continua de refrigerante, se obtuvo una elongación del 9%, lo cual es un 75% de la obtenida en el metal base, contra la realizada en aire, que tuvo un valor del 10%, que resulta en un 83% del metal base. Esta caída en ductilidad es menor que las que se presentan cuando la soldadura se hace mediante procesos convencionales, tales como GMAW o GTAW.

Se sabe que en el ensayo de tracción los límites de grano y precipitados ofrecen resistencia al movimiento de las dislocaciones por ello limitan la deformación plástica. En el caso de la junta realizada bajo alimentación continua de refrigerante se vio que se obtiene una microestructura con menor tamaño de grano, aumentando la superficie de los límites de grano, esto se refleja en una mejora de las propiedades mecánicas de la unión.

Esta limitación en el crecimiento del tamaño de grano durante el proceso de soldadura por fricción batido bajo alimentación continua de refrigerante se debe al menor ingreso de calor debido al aumento de la velocidad de enfriamiento lo cual genera una disminución en la temperatura máxima alcanzada.

Asimismo, en el ensayo de tracción, la carga se concentrará en la zona más débil de la junta, la cual es la región con los valores de dureza más bajos, es en esta zona que la fractura ocurre. Esto concuerda con lo observado en los mapas de distribución de dureza obtenidos, en la cual el menor valor corresponde al lado reverso del avance de la herramienta. Investigaciones anteriores sustentan lo mencionado, en donde se concluye que la resistencia a la tracción es principalmente dependiente del mapa de distribución de durezas que presente la junta.[29]

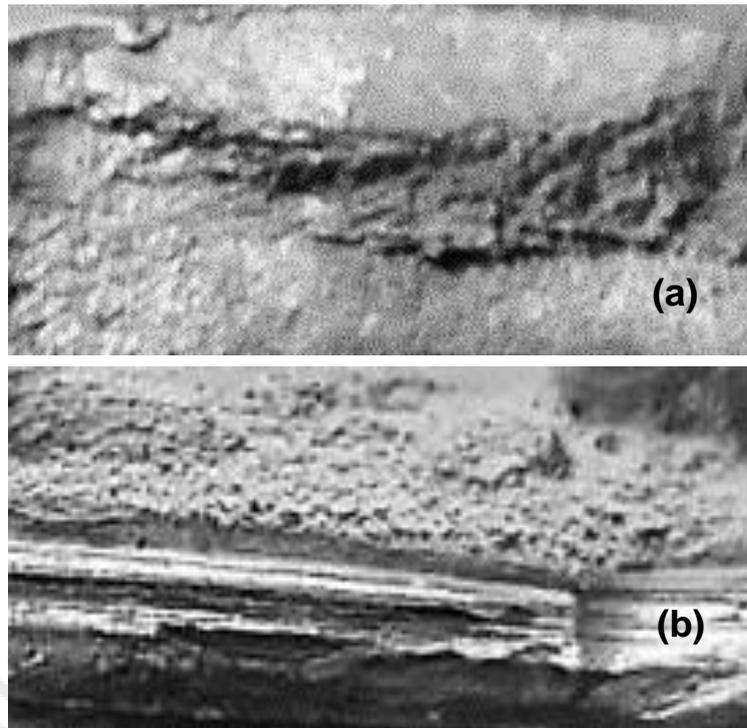
Atención especial también merece el tema de la elongación y la reducción en la ductilidad de las juntas soldadas en ambas atmósferas, las cuales son menores que en el metal base. Esto se puede explicar por el efecto de la localización de la deformación, el cual es un fenómeno de concentración de la carga aplicada, en las zonas de menor dureza, la cual en este caso es la ZTMA, en donde ocurre la elongación. Al ser menor esta zona, menor es la elongación, lo que claramente se observa en la junta soldada bajo líquido refrigerante (Figura 16a).

### **3.6. Análisis de las superficies de fractura**

En la Figura 19 se muestran las superficies de rotura, la cual es distinta en ambos casos (de la soldadura realizada en aire y la realizada en medio refrigerante).

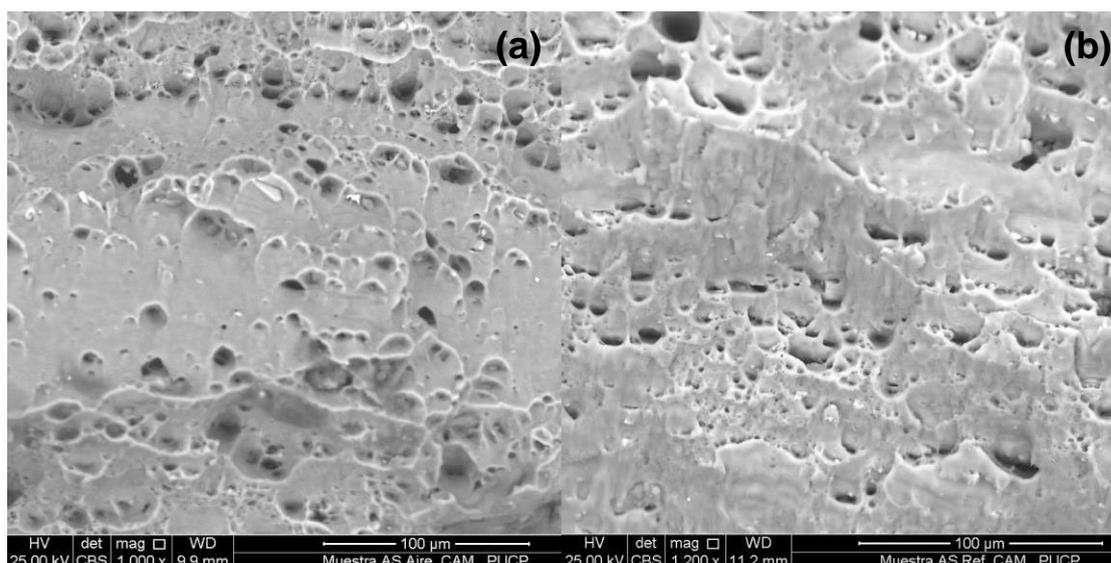
Zonas planas son observadas en la superficie de fractura de la junta realizada en aire, y superficies irregulares en la de la junta realizada en líquido refrigerante.

Las imágenes de microscopía electrónica de barrido a mayor magnificación son presentadas en la figura 20. Independientemente del medio en que fueron soldadas las juntas, estas muestran finos hoyuelos (dimples) direccionados en el sentido de la carga aplicada por lo que se podría decir que la fractura es dúctil.



**Figura 19. Superficies de rotura. (a) Soldadura por fricción batido convencional y (b) Soldadura por fricción batido bajo alimentación continua de líquido refrigerante**

Al ser la ZTMA más ancha en la junta soldada en aire, la fractura ocurre a  $45^\circ$ , pero en la junta soldada bajo líquido refrigerante, la fractura se restringe a una forma similar a la de la periferia soldada, adicionado a la diferente orientación de grano en la interface que ofrece resistencia a la tensión, lo cual resulta en una superficie irregular y no suave.



**Figura 20. Imágenes SEM de las superficies de rotura. (a) Soldadura por fricción batido convencional. (b) Soldadura por fricción batido bajo alimentación continua de líquido refrigerante**

## CONCLUSIONES

- Se logró soldar el aluminio AA5052-H32 en dos atmósferas distintas: Aire y líquido refrigerante, obteniendo uniones satisfactorias y que cumplen con lo establecido por la norma AWS D1.2, con buenas propiedades mecánicas en la junta, comparada con el metal base.
- En ambas atmósferas, parámetros bajos ocasionan cavidades y faltas de llenado en la junta soldada, y parámetros altos ocasionan desplazamientos de material hacia fuera de la línea de soldadura.
- En todas las regiones de la soldadura, se obtuvieron valores ligeramente mayores de dureza en la junta soldada bajo alimentación continua de líquido refrigerante, destacando en la zona de batido (67HV comparado con 65HV).
- En la junta soldada en líquido refrigerante se obtiene una resistencia a la tracción de 217.3 MPa, con la cual se obtiene una eficiencia de junta del 91.1%, contra la obtenida en el aire (208.5 MPa), la cual es solamente un 87.4%. Los valores obtenidos son mayores que los de otros procesos, como GMAW y GTAW.

- El efecto de la atmósfera de líquido refrigerante es bajar el aporte de calor, el cual reduce el crecimiento de grano durante el proceso de soldadura, lo que se traduce en un aumento en la dureza y mejora en las propiedades a la tracción del material soldado (relación Hall-Petch).
- La presencia de granos más finos en la zona batida, una mayor dureza de la misma zona, y un menor ancho de la zona termo mecánicamente afectada son las principales razones para el mejor rendimiento de la junta soldada bajo líquido refrigerante.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Çam and G. İpekoğlu, "Recent developments in joining of aluminum alloys," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 91, no. 5–8, pp. 1851–1866, Jul. 2017.
- [2] Gegesky Megan Alexandra, "Hybrid manufacturing processes for fusion welding and friction stir welding of aerospace grade aluminum alloys," MISSOURI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY , 2016.
- [3] A. S. Vasava, H. B. Patel, B. Desai, and V. Naik, "Review paper on friction stir welding," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 03, no. 12, pp. 505–510, 2016.
- [4] H. Singh Sekhon, R. Kumar, and P. Dhingra, "Optimization of Mechanical Properties of Aluminium Based Alloy (A356) with Friction Stir Welding," *Int. Adv. Res. J. Sci. Eng. Technol. ISO*, vol. 3, no. 11, pp. 33–36, 2016.
- [5] P. Kah, R. Rajan, B. Mvola, and J. Martikainen, "TRENDS IN ALUMINIUM ALLOY DEVELOPMENT AND THEIR JOINING METHODS," *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 44, pp. 383–397, 2016.
- [6] H. Bisadi, M. Tour, and A. Tavakoli, "The Influence of Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al 5083 Alloy Lap Joint," *Am. J. Mater. Sci. 2011*, vol. 1, no. 2, pp. 93–97, 2011.
- [7] F. Heirani, A. Abbasi, and M. Ardestani, "Effects of processing parameters on microstructure and mechanical behaviors of underwater friction stir welding of Al5083 alloy," *J. Manuf. Process.*, vol. 25, pp. 77–84, Jan. 2017.
- [8] S. Sree Sabari, S. Malarvizhi, and V. Balasubramanian, "The effect of pin profiles on the microstructure and mechanical properties of underwater friction stir welded AA2519- T87 aluminium alloy," *J. Mech. Mater. Eng.*, vol. 11, no. 5, pp. 1–14, 2016.
- [9] S. S. Sabari, "INFLUENCES OF TOOL TRAVEL SPEED ON TENSILE PROPERTIES OF UNDERWATER FRICTION STIR WELDED HIGH STRENGTH ARMOUR GRADE ALUMINIUM ALLOY JOINTS," *J. Manuf. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 94–100, 2016.

- [10] M. Emad, "INVESTIGATION OF SUBMERGED FRICTION STIR WELDING OF MARINE-GRADE ALUMINUM ALLOY," American University of Sharjah, 2014.
- [11] T. Garg, P. Mathur, V. Singhal, C. Jain, and P. Gupta, "Underwater Friction Stir Welding: An Overview," *Int. Rev. Appl. Eng. Res.*, vol. 4, no. 2, pp. 2248–9967, 2014.
- [12] CESOL, *Aluminio y aleaciones de aluminio*, 3era. Madrid, 2013.
- [13] W. Hufnagel, P. Coca, and J. Company Bueno, *Manual del aluminio*. Reverté, 1992.
- [14] ASM International, *ASM Handbook - Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials*. 1997.
- [15] ASM International, "Aluminum and Aluminum Alloys," in *ASM Specialty Handbook*, vol. 1, 1993, p. 784.
- [16] S. B. Z. M. ZHANG, "Welding Aluminum Alloy 6061 with the Opposing Dual-Torch GTAW Process," *Weld. Res. Suppl.*, 2010.
- [17] L. Huang *et al.*, "Microstructural characterization of 5083 aluminum alloy thick plates welded with GMAW and twin wire GMAW processes," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 93, no. 5–8, pp. 1809–1817, Nov. 2017.
- [18] B. Ç. Evik, Y. Ozçatalba, and B. Gülenç, "Effect of welding speed on the mechanical properties and weld defects of 7075 Al alloy joined by FSW," *Kov. Mater*, vol. 54, pp. 241–247, 2016.
- [19] P. H. Shah and V. J. Badheka, *An Experimental Insight on the Selection of the Tool Tilt Angle for Friction Stir Welding of 7075 T651 Aluminum Alloys*, vol. 9, no. S1. 2016.
- [20] V. Singh and V. Paroothi, "Study of Microstructure and Mechanical properties of aluminum alloy welded by MIG and TIG welding processes."
- [21] E. Taban and E. Kaluc, "Microstructural and mechanical properties of double-sided MIG, TIG and friction stir welded 5083-H321 aluminium alloy," *Met. Mater.*, vol. 44, no. 1, p. 24, 2006.

- [22] J. Mononen, M. Sirén, and H. Hänninen, “Cost Comparison of FSW and MIG Welded Aluminium Panels,” *Weld. World*, vol. 47, no. 11–12, pp. 32–35, Nov. 2003.
- [23] A. H. Lotfi and S. Nourouzi, “Predictions of the optimized friction stir welding process parameters for joining AA7075-T6 aluminum alloy using preheating system,” pp. 1717–1737, 2014.
- [24] E. R. Oré, “EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE LA ALEACIÓN AA 6063-T6 PROCESADA MEDIANTE FRICCIÓN BATIDO,” Pontificia Universidad Católica del Perú, 2014.
- [25] H. Zhang and H. Liu, “Characteristics and Formation Mechanisms of Welding Defects in Underwater Friction Stir Welded Aluminum Alloy,” *Metallogr. Microstruct. Anal.*, vol. 1, pp. 269–281, 2012.
- [26] P. Podržaj, B. Jerman, and D. Klobčar, “WELDING DEFECTS AT FRICTION STIR WELDING,” *Metal. METABK*, vol. 54, no. 542, pp. 387–389, 2015.
- [27] S. Sree Sabari, S. Malarvizhi, V. Balasubramanian, and G. Madusudhan Reddy, “Experimental and numerical investigation on under-water friction stir welding of armour grade AA2519-T87 aluminium alloy,” *Def. Technol.*, vol. 12, no. 4, pp. 324–333, Aug. 2016.
- [28] S. Sinhmar and D. K. Dwivedi, “Enhancement of mechanical properties and corrosion resistance of friction stir welded joint of AA2014 using water cooling,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 684, pp. 413–422, Jan. 2017.
- [29] H. J. Liu, H. J. Zhang, and L. Yu, “Homogeneity of Mechanical Properties of Underwater Friction Stir Welded 2219-T6 Aluminum Alloy,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 20, pp. 1419–1422, 2011.