CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO** 



SOLDABILIDAD DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 2024 POR EL PROCESO DE SOLDADURA DE FRICCIÓN-AGITACIÓN POR PUNTOS (FSSW) EMPLEADA EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA

POR

NAYELI BECERRA ZAMARRIPA

MONOGRAFÍA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 03 DE JULIO DEL 2015

### CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

### DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



### SOLDABILIDAD DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 2024 POR EL PROCESO DE SOLDADURA DE FRICCIÓN-AGITACIÓN POR PUNTOS (FSSW) EMPLEADA EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA

POR

NAYELI BECERRA ZAMARRIPA

MONOGRAFÍA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 03 DE JULIO DEL 2015

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

### Gerencia de Desarrollo Humano División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **"SOLDABILIDAD DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 2024 POR EL PROCESO DE SOLDADURA DE FRICCIÓN-AGITACIÓN POR PUNTOS (FSSW) EMPLEADA EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA"**, realizada por la alumna **NAYELI BECERRA ZAMARIPA**, con número de matrícula 14ES-170 sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

nB

Dra. Argelia Fabiola Miranda Pérez Tutor Académico

**Dr. Francisco Fernando Curiel** 

López

Tutor en Planta

Dr. Felipe de Jesús García

Vázquez

Asesor

p.D Vo.Bo. Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés

Coordinador de Posgrado

### Corporación Mexicana de Investigación en Materiales Gerencia de Desarrollo Humano División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno NAYELI BECERRA ZAMARRIPA, una vez leída y revisada la Monografía titulada "SOLDABILIDAD DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 2024 POR EL PROCESO DE SOLDADURA DE FRICCIÓN-AGITACIÓN POR PUNTOS (FSSW) EMPLEADA EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA", aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por la alumna para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 03 de Julio del 2015.

Dr. Dagoberto Vázquez Presidente

Dr. Juan Carlos Díaz

Guillén Secretario

Dra. Argelia Fabiola Miranda Pérez Vocal

### Dedicatoria

A Dios, por ponerme oportunidades y retos inigualables; a mis siempre exigentes padres; a todos mis viejos amigos y a los nuevos que a lo largo de este año alegraron cada uno de mis días.

### **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico prestado durante este año y por la oportunidad brindada.

A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA), en especial a la Coordinación de Posgrado y a las personas que lo integran, por permitirme ser parte de esta institución.

A la Dra. Argelia Miranda por el tiempo brindado a este proyecto.

A los doctores que aportaron cosas nuevas a mis conocimientos, y que me hicieron enamorarme una vez más de mi carrera.

A la Universidad de Wisconsin-Milwaukee por recibirme con los brazos abiertos y con el clima más gélido que me ha tocado sentir.

A todas y cada una de las personas que estuvieron en mi camino para hacer el viaje más agradable y que me enseñaron a crecer en todos los aspectos.

## ÍNDICE

1	INTF	RODUCCIÓN2						
	1.1	Antecedentes	?					
	1.2	Objetivos	3					
		1.2.1 Objetivo general	3					
		1.2.2 Objetivos específicos	3					
	1.3	Justificación	3					
	1.4	Planteamiento del problema4	ŀ					
	1.5	Aportaciones4	ļ					
	1.6	Alcance	5					
2	ESTADO DEL ARTE6							
	2.1	Aleaciones de aluminio6	3					
		2.1.1 Antecedentes	3					
		2.1.2 Clasificación	7					
	2.2	Aleaciones de la serie 2XXX10						
		2.2.1 Aleación 2024	2					
		2.2.2 Aplicaciones	5					
	2.3	Proceso de soldadura de fricción agitación (FSW)15	5					
	2.4	Proceso de soldadura de fricción-agitación por puntos (FSSW) 17	7					
		2.4.1 Equipo Fricción-agitación por puntos (FSSW)	)					
		2.4.2 Parámetros del proceso	ŀ					
		2.4.3 Industria aeronáutica	)					
	2.5	Comparación con otros procesos30						
	2.6	Metalurgia de la soldadura						
		2.6.1 Partículas intermetálicas en AA2XXX	)					
		2.6.2 Clasificación de las zonas soldadas	5					
	2.7	Recristalización	;					
		2.7.1 Recristalización dinámica	)					
	2.8	Técnicas de caracterización42	2					

	2.8.1 Caracterización metalográfica
	2.8.2 Microscopía electrónica de barrido
3	DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA
4	CASO DE ESTUDIO
	<ul><li>4.1 Primera etapa: Proceso de soldadura fricción-agitación</li><li>47</li></ul>
	4.2 Segunda etapa: Caracterización de las uniones soldadas
	4.2.1 Caracterización metalográfica
	4.2.2 Microscopía electrónica de barrido
	4.3 Evaluación de dureza
5	CONCLUSIONES
Bib	oliografía
ÍND	DICE DE TABLAS

### Síntesis

En el presente trabajo se muestra una recopilación de información acerca de la aleación de aluminio AA2024-T3 soldada por el proceso de Fricción-Agitación por puntos (FSSW) empleada en la industria aeronáutica.

Hoy en día el aluminio suele ser un material altamente aplicable en productos de transporte, debido a la gran ligereza y a las propiedades mecánicas que ofrece, es por ello la necesidad de unir dicho material y sus aleaciones para ofrecer materiales capaces de adaptarse al diseño moderno que exigen los productos finales.

Los procesos de arco son un tanto complicados para este tipo de materiales, debido a las altas temperaturas de trabajo en comparación a la baja temperatura de fusión del aluminio. Además del requerimiento de un gas de protección para evitar futuros defectos, más allá de los visuales; es decir, la creación de intermetálicos debido a la solidificación póstuma al proceso de soldadura por arco. Es por esta razón que emergen los procesos de soldadura en estado sólido como fuertes candidatos para la unión de este tipo de aleaciones.

La aleación de AA2024-T3 tiene al cobre como principal aleante y es usada en el campo aeronáutico, debido a las destacables propiedades mecánicas que brinda aunado a su baja densidad. En base a la recopilación bibliográfica hecha en el presente documento, se realizó un caso de estudio con placas de AA2024 T3 unidas a traslape por el proceso de soldadura FSSW, las cuales fueron caracterizadas mediante técnicas como microscopia óptica, para el estudio de la microestructura de cada zona característica de las piezas soldadas, y microscopía electrónica de barrido para un análisis de precipitados presentes en las muestras.

# CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

### **1 INTRODUČCIÓN**

### **1.1 Antecedentes**

La aeronáutica es la ciencia cuyo ámbito es el estudio, diseño y manufactura de aparatos mecánicos capaces de elevarse en vuelo, así como el conjunto de las técnicas que permiten el control de las aeronaves.

Debido a la exigencia creciente de la industria aeronáutica para la creación de nuevos materiales que cumplan con los estándares de calidad requeridos para estos productos, en campo, se opta por el uso de aleaciones ligeras.

Esto ha incrementado el uso de materiales más ligeros como las aleaciones de aluminio, que proveen características superiores de resistencia y baja densidad traduciéndolo en un ahorro de peso y consumo de energía, además que poseen una elevada resistencia a la corrosión.

Existen dos principales procesos de soldadura de fricción por puntos que se derivan de la soldadura de fricción-agitación: El primero, desarrollado y patentado por Kawasaki, fue inicialmente llamada unión puntual por fricción, Spot *Friction Joint (SFJ por sus siglas en inglés)* y es ahora conocido como

soldadura de fricción-agitación por puntos *Friction Stir Spot Welding (FSSW*, por sus siglas en inglés). El método y el aparato para la unión es descrita en la patente US 6.601.751 B2 (1). El otro proceso, Refill *Friction Stir Spot Welding (FSSW-Refill)* fue desarrollado por Helmholtz-Zentrum Geesthacht en Alemania (HZG, anteriormente conocido como GKSS). La técnica es descrita en la patente US 6.722.556 B2 (2).

### 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Estudiar la factibilidad de la unión de la aleación de AA2024-T3 mediante el proceso de soldadura de puntos por fricción agitación FSSW, ambos potencialmente aplicables en la industria aeronáutica.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión del estado del arte de la soldabilidad de la aleación de aluminio 2024.
- Determinar los parámetros del proceso de soldadura de puntos por fricción agitación aplicable a aleaciones de aluminio, principalmente la aleación 2024.
- Llevar a cabo las uniones mediante el proceso de soldadura FSSW
- Realizar una caracterización microestructural de las uniones mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.

### 1.3 Justificación

Debido a la presente demanda de nuevos materiales que brinden mejores propiedades mecánicas así como ligereza en el campo aeronáutico, se implementó el uso de las aleaciones de aluminio en gran parte de los componentes de partes de aviones. La producción e implementación de materiales con una calidad superior, requiere de la optimización de las características microestructurales de este material una vez que se ha sometido a un proceso de manufactura, en este caso la soldadura.

En ese sentido, la finalidad de este proyecto es la utilización del proceso de soldadura fricción agitación por puntos (FSSW) para aleaciones de aluminio, en específico la AA2024-T3, comprobando así la soldabilidad de la misma.

### 1.4 Planteamiento del problema

La industria aeronáutica en el mundo genera más de 450 mil millones de dólares y es fuente de empleos especializados, así como de actividades estrechamente ligadas al desarrollo de nuevas tecnologías. Lo que contribuye a detonar la actividad innovadora y generar mayor valor agregado a lo largo de su cadena productiva, sobretodo en la medida que se participa en el diseño y manufactura de partes y sistemas de avión más complejos.

El uso de procesos de soldadura comunes en aleaciones base aluminio genera la precipitación de fases intermetálicas bajando así las propiedades mecánicas del producto y aumentando así su factibilidad a la falla en campo. Es por eso que existe una necesidad en el campo de soldadura de un proceso que minimice los efectos negativos provocados por los precipitados generados por procesos de unión comunes.

Concretamente este proyecto está enfocado a la factibilidad de la soldadura por medio del proceso de fricción-agitación por puntos en la aleación 2024, incluyendo el impacto que tendrán sus parámetros y variables del mismo.

### **1.5** Aportaciones

Experimentación de parámetros del proceso de soldadura FSSW, basado en revisión bibliográfica, en la aleación de AA2024-T3, la recopilación de

información acerca del material en general así como las técnicas de caracterización por microscopía óptica, micrografía electrónica de barrido.

### **1.6 Alcance**

Realizar una recopilación bibliográfica sobre el proceso de soldadura FSSW en la AA2024-T3.

Llevar a cabo un caso de estudio con placas con un espesor de 3mm, soldada por el proceso FSSW. Siendo, las muestras, caracterizadas mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, así como un estudio de dureza.

# CAPÍTULO II ESTADO DEL ARTE

### 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Aleaciones de aluminio

### 2.1.1 Antecedentes

El aluminio es el metal no ferroso mayormente consumido en el mundo, con un consumo promedio anual de 24 millones de toneladas.

En la naturaleza, el aluminio no existe como metal debido a su alta afinidad química por el oxígeno. Los compuestos de aluminio, principalmente óxidos, están ampliamente distribuidos en la naturaleza. En esta forma, el aluminio es el segundo elemento metálico más abundante en la Tierra.

Aunque el aluminio es uno de los materiales más abundantes en la corteza terrestre (invariablemente como alúmina o en forma de cualquier otro óxido) cualquier depósito mineral utilizable debe ser fácilmente susceptible a obtener beneficio, de esta manera puede ser obtenido un óxido de aluminio puro. Sin embargo, el beneficio físico de los óxidos no ha sido muy exitoso. Por consiguiente el procesamiento químico ha sido siempre necesario para extraer alúmina pura de los otros ingredientes asociados con ella en el depósito mineral. Esto, por lo tanto, restringe el rango práctico de los materiales.

La bauxita contiene formas hidratadas de óxido de aluminio, y son así las fuentes de mineral más económicamente costeables para beneficio químico para la producción de alúmina. El nombre de "bauxita" es derivado del pueblo *Les Baux* en el sur de Francia, donde el mineral fue explotado comercialmente por primera vez. El óxido deshidratado del aluminio tiene una temperatura de fusión de 2050 °C y de ebullición de 2980 °C sin descomposición, resulta una sustancia muy estable. La reducción del óxido a aluminio resulta imposible con carbono o con monóxido de carbono ya que este proceso lleva a la formación de carburos. Tampoco se logra obtener aluminio por disolución acuosa de sales, ya que en el cátodo se desprende solo hidrógeno.

Por eso, el aluminio se obtiene por electrólisis, a partir de la alúmina disuelta en criolita (Na3AIF6) fundida, la que a su vez se produce usando fluorita (CaF2), el hidróxido de aluminio, el carbonato sódico y el ácido sulfúrico. (3)

### 2.1.2 Clasificación

El aluminio, como todos los metales puros, tiene una baja resistencia mecánica, y no puede ser usado en aplicaciones donde la resistencia a la deformación y a la fractura es esencial. Por lo tanto otros elementos son añadidos al aluminio, principalmente para mejorar la resistencia mecánica. El rango de resistencia a la tensión típica es de 45 MPa (6.5 ksi) para las láminas 1199-O hasta casi 700MPa (100ksi) para los productos extruidos 7055-T77. La baja densidad combinada con una alta resistencia ha hecho de las aleaciones de aluminio un atractivo para aplicaciones en donde la resistencia específica (resistencia por relación de densidad) es una consideración principal de diseño. (4)

Las propiedades de las aleaciones de aluminio dependen de una compleja interacción de composición química y características microestructurales

desarrolladas durante la solidificación, tratamientos térmicos, y (para productos forjados) procesamiento de deformación. Aunque el aluminio puro es muy resistente a la corrosión debido a la presencia de una película de óxido de aluminio, la resistencia a la corrosión generalmente disminuye con el incremento de contenido de aleación, así los temples han sido desarrollados para mejorar la resistencia a la corrosión de la mayoría de los materiales aleados. (5)

Es conveniente dividir las aleaciones de aluminios en dos categorías principales: productos de vaciado y productos de forjado. Una mayor diferenciación de cada categoría está basada en el mecanismo primario de desarrollo de propiedades. Muchas aleaciones responden a los tratamientos térmicos basados en solubilidad de fase. Estos tratamientos incluyen un tratamiento térmico de solubilizado, templado y precipitación, o envejecido.

El sistema de identificación de dichas aleaciones emplea diferentes nomenclaturas para las aleaciones vaciadas y las forjadas, además que divide a las aleaciones en familias para su simplificación. Para aleaciones forjadas es usado un sistema de cuatro dígitos como a continuación se nombran: (6)

- 1xxx Composiciones sin alear controladas
- 2xxx Aleaciones en las cuales el cobre es el principal elemento de aleación
- 3xxx Aleaciones en las cuales el manganeso es el principal elemento de aleación.
- 4xxx Aleaciones en las cuales el silicio es el principal elemento de aleación
- 5xxx Aleaciones en las cuales el magnesio es el principal elemento de aleación
- 6xxx Aleaciones en las cuales el magnesio y el silicio son los principales elementos de aleación

- 7xxx Aleaciones en las cuales el zinc es el principal elemento de aleación, pero otros elementos como el cobre, magnesio, cromo, y zirconio pueden estar especificados.
- 8xxx Aleaciones que incluyen estaño y algunas composiciones de litio características de composiciones misceláneas.
- 9xxx Reservado para uso futuro.

Las composiciones de vaciado son descritas por un sistema de tres dígitos seguido de un valor decimal. El decimal .0 en todos los casos pertenece a los límites de las aleaciones vaciadas. Los decimales .1, y .2 tienen que ver con la composición de los lingotes, la cual después de la fusión y el procesamiento debe resultar en análisis químicos de acuerdo a los requerimientos de la especificación de la vaciada. Las familias de aleaciones vaciadas son: (6)

- 1xx.x Composiciones sin alear controladas, especialmente para la manufactura de rotor.
- 2xx.x Aleaciones en las cuales el silicio es el principal elemento de aleación, pero otros elementos de aleación pueden ser especificados.
- 3xx.x Aleaciones en las cuales el manganeso es el principal elemento de aleación
- 4xx.x Aleaciones en las cuales el silicio es el principal elemento de aleación
- 5xx.x Aleaciones en las cuales el magnesio es el principal elemento de aleación
- 6xx.x No usado
- 7xx.x Aleaciones en las cuales el zinc es el principal elemento de aleación, pero otros elementos como el cobre y magnesio pueden estar especificados.

- 8xx.x Aleaciones en las cuales el estaño es el principal elemento de aleación
- 9xx.x No usado.

En las aleaciones de aluminio forjadas (2xxx hasta la 8xxx), el segundo dígito en la designación indica la modificación de la aleación. Si el segundo dígito es cero, indica que se trata de la aleación original, enteros del 1 al 9, asignados consecutivamente, indican modificaciones de la aleación original. Los últimos dos de los cuatro dígitos en los grupos desde 2xxx hasta la 8xxx no son de gran significado, pero sirven para identificar las diferentes aleaciones de aluminio en el grupo. (6)

### 2.2 Aleaciones de la serie 2XXX

El cobre es el principal elemento de aleación en el grupo de la serie 2xxx, algunas veces con el magnesio como adición secundaria. Estas aleaciones requieren tratamiento térmico de solución para obtener propiedades óptimas. En la condición de tratamiento térmico de solución, las propiedades mecánicas son similares, y algunas veces exceden, a lo aceros de bajo carbono. En algunos casos, el tratamiento térmico de precipitación (envejecido) es empleado para promover el incremento de las propiedades mecánicas. Este tratamiento incrementa el límite elástico, con La consiguiente pérdida en la elongación, su efecto en la resistencia a la tensión no es tan bueno. (7)

Las aleaciones en la serie 2xxx no tienen buena resistencia a la corrosión como la mayoría de las aleaciones de aluminio, bajo ciertas condiciones pueden estar sujetos a corrosión intergranular. Por lo tanto, estas aleaciones en forma de lámina son recubiertas con un aluminio de alta pureza o con aleaciones de Mg-Si de la serie 6xxx, las cuales proveen protección galvánica del material e incrementan la resistencia a la corrosión. (8)





Figura 2.1 Diagrama Al-Cu (8)

El cobre es el elemento de aleación principal en las aleaciones de la serie 2xxx. Éste tiene una solubilidad máxima de 0.1% a temperatura ambiente, y 5.7% a 548°C como se muestra en la Figura 2.1 (8)



Figura 2.2 Efecto de los elementos de aleación en las propiedades mecánicas (7)



Figura 2.3 Efecto de los elementos de aleación en la soldabilidad y anodizado (7)

En la Figura 2.2y 2.3 se muestra el efecto de los elementos de aleación sobre las propiedades y características de las diferentes agrupaciones de las series designadas para las aleaciones de aluminio. (7)

### 2.2.1 Aleación 2024

La aleación 2024 es una de las aleaciones de aluminio de alta resistencia más conocidas. Es fácilmente maquinada con una superficie con características físicas adecuadas para la aplicación del producto. Los procesos de soldadura por arco no son generalmente recomendados, aunque esta aleación puede ser soldada por puntos o costura. Además su resistencia a la corrosión es relativamente baja, esta aleación es comúnmente usada con un acabado anodizado o en forma revestida con una delgada capa de aluminio de alta pureza.

Con el cobre como el principal elemento de aleación, estas aleaciones requieren de tratamiento térmico de solución para lograr propiedades mecánicas óptimas, las cuales pueden exceder al acero dulce. (5)

12

Generalmente, estas aleaciones están limitadas en el conformado en frío, excepto en su forma de recocido, son anodizadas para protegerlas cuando van a ser empleadas en ambientes químicamente agresivos. Estas aleaciones son particularmente usadas para aplicaciones militares y en aeronaves. (7)

La composición química sugerida para estas aleaciones se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Composición química (%e.p.) de la aleación comercial AA2024 (8)

Aleación	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti
2024	3.8-4.9	0.50	0.50	0.3-0.9	1.2-1.8	0.25	0.1	0.15

Sus propiedades mecánicas se enlistan en la Tabla 2.2

Propiedad	Valor
Dureza	137 HV
Resistencia a la tensión	483MPa
Elongación	10%

Tabla 2.2 Propiedades Mecánicas de AA2024-T3

### 2.2.1.1 Tratamiento térmico de aleaciones de aluminio.

La especificación de una aleación de aluminio no está completa sin la designación de la condición metalúrgica, o templado, de la aleación. Un sistema de designación del temple, únicamente para aleaciones de aluminio, fue desarrollado por la *Aluminium Association* y es usado para todas las aleaciones tanto forjadas como vaciadas. La designación del temple sigue a la designación de la aleación, ambos separados por un guión medio.

Las aleaciones de aluminio forjadas se dividen en dos categorías. Las aleaciones no tratables térmicamente son aquellas que derivan su resistencia por solución sólida o endurecimiento por dispersión y se convierten en más resistente con endurecimiento por deformación. Estas incluyen las aleaciones con serie 1xxx, 3xxx, 4xxx, y 5xxx. Las aleaciones tratables térmicamente son reforzadas por tratamiento térmico de solución y envejecimiento controlado, e

incluyen las aleaciones de serie 2xxx, algunas 4xxx, 6xxx y 7xxx. En la Tabla 2.3 se pueden observar la designación de los tratamientos posteriores al conformado, mientras que en la Tabla 2.4 se muestran las subdivisiones del temple T. (9)

Tabla 2.3 Designación de tratamientos posteriores al conformado. (9)

-	
"F"	<i>Fabricado:</i> Aplica para productos de procesos de conformado en los cuales un control no especial sobre las condiciones térmicas o de endurecimiento por trabajado son empleados. Los límites de las propiedades mecánicas no son asignados para las aleaciones de forjado en esta clasificación.
"O"	<i>Recocido:</i> Aplica para productos de forja que han sido calentados para efecto de recristalización, produciendo la más baja condición de resistencia, y para productos vaciados que son recocidos para mejorar la ductilidad y la estabilidad dimensional.
"Н"	<i>Endurecido por deformación:</i> Aplica para productos forjados que son reforzados por endurecimiento por deformación a través de trabajado en frío. El endurecido por deformación debe ser seguido por un tratamiento térmico suplementario, el cual produce un poco de reducción en la resistencia.
"W"	<i>Tratamiento térmico de solución:</i> Aplicable solo para aleaciones que envejecen de forma espontánea a temperatura ambiente después del tratamiento térmico por solución.
<u>«</u> ۲»	<i>Tratado térmicamente:</i> Aplica a productos que son tratados térmicamente, algunas veces con endurecimiento por deformación, para producir un temple estable. La letra T es siempre seguida de uno o más dígitos.

#### Tabla 2.4 Subdivisiones de Temple T (9)

T1	Envejecido naturalmente después de un enfriamiento desde una
- 11-	elevada temperatura de un proceso de conformado.
T2	Trabajado en frío después de un enfriamiento desde elevada
1000	temperatura de un proceso de conformado y después envejecido
	temperatura de un proceso de comornado y después envejecido
	naturalmente
T3	Tratamiento térmico de solución, trabajado en frío y envejecido
	naturalmente
TA	
14	i ratamiento termico de solucion y envejecido naturalmente.
T5	Envejecido artificialmente después enfriado desde una temperatura
	elevada de un proceso de conformado
TG	Tratamiento térmico de colución y enveienido estificialmente
10	Tratamiento termico de solución y envejecido artificialmente.
T7	Tratamiento térmico de solución y estabilizado (sobre-envejecido).
T8	Tratamiento térmico de solución, trabajado en frío y envejecido
	artificialmente
19	l ratamiento térmico de solución, envejecido artificialmente, y
	trabajado en frío.
T10	Trabajado en frío después enfriado desde una temperatura elevada

#### de un proceso de conformado y después envejecido artificialmente.

El tratamiento térmico de solución involucra el calentamiento de la aleación a una temperatura ligeramente por debajo del punto eutéctico. El tratamiento térmico de solución desarrolla la cantidad máxima de soluto dentro de la solución sólida. Esto requiere un calentamiento del material cerca a la temperatura eutéctica y el mantenimiento del material a ésta temperatura durante un tiempo suficiente para permitir completar la solución sólida. Después del tratamiento térmico de solución, el material es templado para mantener el soluto en la solución sólida sobresaturada. La temperatura del tratamiento térmico de solución para la aleación 2024 es descrita en la Tabla 2.5 (9)

Tabla 2.5 Comparación del rango de temperaturas del tratamiento térmico de solución y de temperatura eutéctica inicial de fusión para aleaciones de la serie 2xxx. (9)

Aleación	Rango de temperatura	Temperatura eutéctica
	para el tratamiento	inicial de fusión, °C
	térmico de solución, °C	
2014	496-507	510
2017	496-507	513
2024	488-507	502

### 2.2.2 Aplicaciones

Los productos de la aleación 2024 son usados en perfiles estructurales de fuselaje, principalmente, componentes de tensión del ala, áreas estructurales donde se requiere rigidez, resistencia a la fatiga y una buena resistencia mecánica. Los productos laminados de esta aleación son ampliamente usados en aviones comerciales y militares para aplicaciones en fuselaje, revestimiento de alas y área de motor, donde a menudo se trabaja con temperaturas de hasta 121°C (10)

### 2.3 Proceso de soldadura de fricción agitación (FSW)

El procedimiento *Friction Stir Welding*, FSW, por sus siglas en inglés ha sido inventado, patentado y perfeccionado para su uso en aplicaciones industriales por el Instituto de Soldadura (TWI) en Cambridge, Reino Unido. El método FSW está basado en el principio de obtener temperaturas suficientemente altas para forjar dos componentes de aluminio, utilizando una herramienta giratoria que se desplaza a lo largo de una unión a tope. El calor generado por la fricción entre la herramienta y las piezas a unir, provoca el ablandamiento del material base sin llegar a alcanzar el punto de fusión y permite el desplazamiento de la herramienta a lo largo de la línea de soldadura. El material en estado plástico se transfiere a la parte posterior de la herramienta y se forja por el contacto íntimo del pin de la herramienta y el perfil de la protuberancia de la misma. Al enfriarse deja una unión en fase sólida entre las dos piezas. En la Figura 2.4 se muestra gráficamente las etapas del proceso, 1 y 2) Una vez que la herramienta ha adquirido la velocidad necesaria, penetrará en la junta y empezará a subir la temperatura de esa zona, debido a la fricción, y el material empezará a ablandarse, adquiriendo un estado plástico. En ese momento la herramienta empezará a moverse a lo largo de la junta (3 y 4) desplazando el material que se encontraba en la cara anterior del perno a la cara posterior, a través del movimiento de rotación de dicha herramienta, y será cuando el material se enfriará y pasará de nuevo a un estado sólido produciéndose de esta forma la soldadura. Una vez que se ha terminado la unión se extraerá la herramienta (5 y 6) quedando un pequeño agujero, correspondiente al perno, el cual podrá eliminarse cambiando el tipo de perno.

La soldadura por fricción-agitación, puede ser utilizada para unir chapas de aluminio sin material de aporte o gas de protección. El espesor del material varía hasta 30 mm, pudiendo ser soldados con penetración total y sin porosidad ni cavidades internas.

Se consiguen soldaduras de alta calidad e integridad con una muy baja distorsión, en muchos tipos de aleaciones de aluminio, incluso aquellas consideradas de difícil soldadura por métodos de fusión convencionales.

Entre los materiales que han sido soldados con éxito mediante soldadura por fricción se incluyen una amplia variedad de aleaciones de aluminio (series 2xxx,

5xxx, 6xxx, 7xxx y 8xxx) y aleaciones Al-Li. Recientemente se han conseguido mediante éste método uniones en plomo, cobre, magnesio e incluso aleaciones de titanio. (11)



Figura 2.4 Proceso FSW (11)

## 2.4 Proceso de soldadura de fricción-agitación por puntos (FSSW)

Recientemente, una variante de la FSW lineal llamada *Friction Stir Spot Welding* (FSSW) ha sido desarrollada e implementada en la industria automotriz como un reemplazo de la soldadura de puntos por resistencia (*RSW*, por sus siglas en inglés) para el aluminio.

Esta tecnología de soldadura involucra un proceso similar al FSW, excepto que, en lugar del movimiento de la herramienta a lo largo del cordón de soldadura, la herramienta solo indenta las partes, las cuales están localizadas encima una de la otra.

En las aleaciones de aluminio, se dificulta soldar por proceso de fusión, debido a problemas presentados durante el proceso como son el requerimiento de gas protector, la remoción de las capas de óxido de la superficie y la generación de poros y agrietamiento en la solidificación , así como la formación de intermetálicos perjudiciales a las propiedades finales de la unión. Ante esta situación surge como alternativa la soldadura por fricción agitación de puntos, que ofrece grandes ventajas competitivas frente a los procesos de soldadura por fusión, dado que es un proceso de soldadura en estado sólido, que no requiere de material de aporte o gas protector, la energía utilizada es menor y consecuentemente la zona afectada por el calor y los esfuerzos residuales asociados con la soldadura son relativamente pequeños, con microestructura fina en la zona de la unión y la ausencia de fisuras y porosidad. (12)

Se han desarrollado sistemas robotizados para la unión de láminas de aluminio. Uno de ellos está compuesto por una pistola especialmente diseñada para soldadura por fricción agitación por puntos y de un robot multiarticulante. La pistola tiene una sonda de soldadura con movimientos rotacionales y axiales ejecutados individualmente por servomotores; por lo tanto, toda la secuencia de soldadura es controlada por la unidad central de procesamiento (CPU) del sistema del robot. No sólo la unión de soldadura tiene propiedades mecánicas iguales o superiores sobre otros procesos como son, por ejemplo, el RSW convencional, además mostró un consumo de energía significativamente menor.

En el proceso de soldadura por fricción-agitación por puntos en láminas metálicas, Figura 2.5, una herramienta giratoria desciende penetrando la lámina superior y parte de la lámina inferior, manteniendo la fuerza descendente aplicada y la velocidad de rotación por un tiempo adecuado, hasta cuando el material adyacente a la herramienta, calentado por la fricción y ablandado, es deformado plásticamente, y en estado sólido se adhieren las láminas superior e inferior, finalmente se retira la herramienta dejando las láminas soldadas. (13)



Figura 2.5 Proceso FSSW (12)

La superficie superior de la soldadura luce como un botón con un orificio y la superficie inferior es mantenida casi plana. En la sección transversal hay un orificio que es hecho por la herramienta y alcanza la lámina inferior. Como se muestra en la Figura 2.6. (13)



Figura 2.6 Apariencia de la soldadura fricción agitación por puntos y sección transversal (13)

### 2.4.1 Equipo Fricción-agitación por puntos (FSSW)

El equipo empleado para llevar a cabo las soldaduras del proceso FSSW es básicamente el mismo equipo utilizado en su antecesor, el proceso FSW.

El logro de la alta calidad y consistencia en las soldaduras hechas por FSW depende principalmente a las siguientes tres áreas: (8)

- Herramienta (pin) y programa de soldadura, el pin del FSSW necesita ser diseñado en cierto modo para que mezcle los materiales para las aleaciones dadas y que sea el indicado conforme al espesor de la parte.
- Máquina, el desempeño de la máquina con las soldaduras debe ser capaz de controlar los parámetros críticos de soldadura dentro de un rango establecido.
- Herramental, la parte a ser soldada necesita ser exactamente localizada y retenida en posición durante el proceso de soldadura.

Existen diferentes tipos de máquinas para FSW. Algunas están configuradas para una aplicación específica y otras están en una configuración más general que les permite soldar un rango más amplio de partes. Los detalles de cómo una máquina es diseñada dictan el rango de aplicaciones que es capaz de soldar.

Para el nivel más básico, los requerimientos para una máquina de FSW necesitan incluir la funcionalidad y el rendimiento requeridos para generar las soldaduras deseadas. (8)

El equipo de FSSW comprende cuatro principales componentes: Una herramienta, husillo, servomotor y una base. El servomotor provee la carga axial en el proceso.

El sistema de FSSW usa un equipo de soldadura capaz de unir componentes largos y estructuras de materiales resistentes. Así, el sistema es capaz de frotar suavemente una herramienta de soldadura de 10 mm, a una fuerza de soldadura de 35 kN con una fuerza aplicable de 60 Nm. El pin puede girar en ambas direcciones a una velocidad máxima de rotación de 3300 rpm.

La pistola de FSSW fue diseñada y manufacturada para propiciar las condiciones necesarias para la unión mediante este proceso en estado sólido. La Figura 2.7 muestra la apariencia del diseño de la pistola. Ésta tiene una estructura en forma de C similar a las pistolas convencionales de RSW y consiste principalmente de una unidad de rotación de la herramienta y una unidad de carga axial. (13)



Figura 2.7 Diseño de la pistola de soldadura de fricción-agitación por puntos (FSSW) (14)

La pistola de FSSW está atada a un robot multiarticulado con seis ejes de movimiento, como se muestra en la Figura 2.8. En este sistema un CPU del controlador del robot también controla el movimiento axial y la rotación de la herramienta. El controlador del robot tiene un programa de secuencia de soldadura que ejecuta el cambio secuencial preciso de la velocidad rotacional de la herramienta durante la soldadura. (13)



Figura 2.8 Sistema robotizado de la soldadura de fricción-agitación por puntos. (13)

Algunos de los quipos disponibles en el mercado que realicen este tipo de soldadura son: (15)

• Aero System: Este equipo tiene como cliente principal a *The Eclipse Aviation Corporation.* Donde principalmente realiza soldaduras de largueros y estructuras para la parte externa de aeronaves. Usadas para cabinas principales, alas, fuselaje de popa.

Process/production development system (PDS)

Este equipo tiene como objetivo principal abarcar un amplio rango de aplicaciones y dimensiones. Su principal mercado son grupos de desarrollo y de investigación. (15)

### 2.4.1.1Herramental

Decidir el tipo de soldadura que será realizada; de pin fijo, pin ajustable, o auto-reaccionante es un buen punto de partida para la especificación de requerimientos.

Con la soldadura con pin fijo, la herramienta pin es una pieza que consiste en un hombro y un pin. La soldadura de pin fijo es la forma más tradicional de FSW y es la más fácil de manejar desde el diseño de la máquina y la perspectiva del control.

Con la soldadura de pin ajustable, la herramienta consiste en dos piezas: un pin y un hombro (desnivel), los cuales son capaces de moverse independientemente uno de otro. Este método de soldadura permite mayor flexibilidad en las partes soldadas. Por ejemplo las partes cónicas pueden ser soldadas y el ligamento del pin (la distancia de la punta del pin hasta la parte posterior de la soldadura) puede ser mantenido mientras el hombro permanece en la superficie de la parte. Adicionalmente, el pin ajustable puede ser usado para cerrar el hoyo del pin que existe cuando retiras un pin fijo de una soldadura.

El herramental convencional aprovecha la pieza de trabajo de uno de los lados, mientras la pieza de trabajo es sostenida por la base del equipo. Este tipo de herramental solo penetra parcialmente la pieza de trabajo, dejando una muy ligera separación entre el final del pin y la base del equipo. (15)

El herramental se encuentra sujeto a esfuerzos severos y altas temperaturas particularmente en el proceso de soldadura de aleaciones de elevada dureza tal como acero y aleaciones de titanio, por lo que el elevado costo del herramental se vuelve una de las principales limitantes para la implementación de uniones bajo este proceso en particular,

### 2.4.1.1.1 Materiales

#### a) Acero grado herramienta

Los herramentales de acero grado herramienta, son ideales para unir materiales tales como aleaciones de aluminio o de magnesio.

b) Nitruro de boro cúbico policristalino (PCBN)

El PCBN es uno de los materiales predilectos para la unión de aleaciones de alta dureza, debido a su alta dureza y resistencia a altas temperaturas, ya que el bajo coeficiente de fricción del mismo da como resultado un acabado superficial terso en la soldadura.

#### c) Tungsteno

Este material es resistente a elevadas temperaturas pero tiene una baja tenacidad a temperatura ambiente, y se desgasta con facilidad cuando se emplea como material para herramienta para aceros y aleaciones de titanio. (16)

### 2.4.2 Parámetros del proceso

La formación de la unión soldada es materia de un ambiente térmico específico, que a su vez dicta y es responsable por la selección de los parámetros del proceso apropiados para encontrar las restricciones metalúrgicas y ambientales impuestas durante el proceso. La temperatura del proceso juega un rol muy importante en la determinación de la habilidad para deformarse de un material. Cada material tiene un rango de temperatura, el cual proveerá el nivel máximo de conformación durante la deformación. En el caso del endurecimiento por precipitados, referido de otra manera como endurecimiento por envejecido o aleaciones de aluminio tratables térmicamente, la temperatura alcanzada durante el proceso es conocida por influir en la distribución de los precipitados a través de la soldadura. Para el caso de las aleaciones forjadas las cuales no responden al endurecimiento por envejecido, el incremento de la temperatura del proceso acelera el deslizamiento de las dislocaciones, lo cual disminuye el grado de endurecimiento por deformación. (8)

Por otra parte, el torque depende de algunas variables como la presión vertical aplicada, el diseño de la herramienta, el esfuerzo de corte local en la interface del material de la herramienta, el coeficiente de fricción y el grado de deslizamiento entre la herramienta y el material. (16)

Parámetros como velocidad de rotación y tiempo de permanencia fueron examinados por Zhaohua Zhang y colaboradores (2011) donde se trabajó con placas de aluminio AA5052 de 1mm de espesor, variando los parámetros de velocidad de rotación de 154 rpm y 2256 rpm. En cada una de las velocidades se varió el tiempo de permanencia en 5, 10 o 15 s.

Las propiedades analizadas, además de la microestructura, fueron dureza y resistencia. Destacándose que la microestructura tiende a engrosar con el incremento de la velocidad rotacional de la herramienta, como se observa en la Figura 2.9.



Figura 2.9 Microscopía óptica de la muestra realizada a una velocidad de rotación de 1541 rpm b) BM c) HAZ d) TMAZ e) SZ (14)

La propiedad de resistencia se ve afectada por la velocidad de rotación, siendo una propiedad muy poco afectada por el tiempo de permanencia del herramental, elaborado con acero inoxidable 1Cr18NiTi. (14)

Mientras que R. Falla y compañía en el 2012 realizaron pruebas de soldabilidad para medir las propiedades mecánicas de la aleación AA6063 en condición T5, usándose láminas extruidas de esta aleación con medidas de 7.2 mm de ancho por 125 mm de longitud y 2.8 mm de espesor unidas a traslape con tres puntos de soldadura separados a 25.4 mm como se muestra en la Figura 2.10, luego se cortaron en tiras individuales para tener una probeta por cada punto.



Figura 2.10 Lámina de AA6063-T5 con tres puntos de soldadura (FSSW). (17)

Los parámetros del proceso variaron en velocidades de rotación de 1600 y 1120 rpm, el tiempo de permanencia de 2, 5 y 10 segundos, velocidad de penetración constante de 6.25 mm/min. La soldadura se llevó a cabo en una fresadora universal en la cual se adaptó un dispositivo de sujeción con una lámina de respaldo. El material del herramental utilizado es acero AISI/SAE H13, con un tratamiento térmico de temple y revenido con una dureza de 48HRC.

Se realizó un análisis macrográfico de las piezas definiéndose así las zonas que se derivan de este proceso, observándose en la Figura 2.11 la muestra representativa del tiempo de permanencia de 5s con una velocidad de rotación de 1120 rpm.



Figura 2.11 A: Zona de Agitación (SZ), B: Zona termomecánicamente afectada (TMAZ), C: Zona térmicamente afectada (HAZ), D: Metal base (17)

La dureza fue medida a lo largo de las zonas mencionadas, presentando una disminución drástica a lo largo de la TMAZ, como se observa en la Figura 2.12.



Velocidad Herramienta 1120 – 1600 rpm

Figura 2.12 Perfil de dureza con variantes de velocidad de rotación. (17)

Las soldaduras con la combinación de velocidad de rotación de 1120 rpm y el tiempo de permanencia de 2 y 5s presentaron las mejores propiedades mecánicas en los ensayos de microdureza y tensión, mientras que con el
análisis de las macrografías se constató la calidad de las soldaduras, la cual se caracterizó por estar libre de poros y agrietamientos.

La dureza decrece en la zona soldada casi un 45% en comparación con el metal base, mientras que la dureza en la zona termomecánicamente afectada y en la zona de agitación, es mejorada debido a la recristalización, como se observa en la Figura 2.13. (17)



Figura 2.13 Perfil de dureza realizado a lo largo de las muestras. (17)

### 2.4.3 Industria aeronáutica

La clasificación de soldadura en estado sólido, en específico la unión por fricción agitación, es un proceso que tiene muchas aplicaciones industriales, predominando la fabricación de componentes de aluminio y paneles. (15)

Corporaciones estadounidenses han decidido remplazar los procesos tradicionales de remachado y unión, con procesos de fricción.

En el año del 2002 la *Eclipse Aviation Corporation* anunció que la Administración Federal de Aviación (por sus siglas en inglés FAA), aprobó la especificación de los procesos de fricción para implementarse en el ensamblado del jet *Eclipse 500*.

Compañías como Airbus ha mostrado interés en este tipo de procesos de unión desde 1998, y ha invertido en muchas máquinas de laboratorio enfocándose en dimensiones delgadas y gruesas de aleaciones de aluminio soldadas. A la fecha dicha compañía ha madurado el proceso para aplicaciones en el fuselaje y las alas mediante la validación de las propiedades mecánicas y tecnológicas de las uniones. (8)

#### 2.5 Comparación con otros procesos

El crecimiento de los procesos de unión por fricción se dio en gran medida gracias a otros procesos de unión. En algunas áreas, por ejemplo en la manufactura de los esqueletos de avión, el proceso original (fijación mecánica) es lento y caro, y la oportunidad de ser reemplazado con un proceso mecanizado, el cual puede dar buenos resultados en aleaciones resistentes, es muy atractivo. En este caso los procesos de fricción son particularmente relevantes, ya que muchas aleaciones aeroespaciales de alta resistencia son difíciles de unir por procesos de fusión. Sin embargo, en otras industrias, el reemplazo de procesos como MIG y TIG por soldadura por fricción nunca será completo, ya que estos procesos ofrecen capacidades que la soldadura por fricción no puede ofrecer.

Es bueno recordar que otros procesos competentes están siendo desarrollados. En particular, en la última década se ha visto enorme progreso en el desarrollo de la tecnología láser. Así como la soldadura por arco se ha convertido en un proceso más sofisticado, basándose en la tecnología para sustentar así el desarrollo de fuentes de poder más complejas. (8)

#### 2.6 Metalurgia de la soldadura

El proceso FSSW ha emergido como un proceso prometedor en estado sólido con el potencial de unir materiales de bajo punto de fusión, particularmente aleaciones de aluminio. Las razones más atractivas para la unión de aleaciones de aluminio a través de este proceso son la anulación de defectos de solidificación formados por procesos de soldadura convencionales, la baja distorsión y bajos esfuerzos residuales. Por consiguiente, FSSW es efectivo y ha sido sistemáticamente desarrollado para la unión de aleaciones de aluminio, especialmente aquellas que usualmente son consideradas como no-soldables o difíciles de soldar como las series 2xxx y 7xxx. (18)

Una clase especial de la serie 2xxx son las aleaciones que contienen Mg y Mn, comercialmente conocidas como Duraluminio. Su rango de composición química se especifica en la Tabla 2.6

Tabla 2.6 Variación en rango de composición química en aleaciones de la serie 2xxx. (Elemento/ %peso)

Elemento	Cu	Mg	Mn
% En peso	4-4-5%	0.5-1.5%	0.5-1%

El magnesio es conocido por acelerar e intensificar el envejecido natural representativo de las aleaciones de Al-Cu. Dependiendo de la cantidad de Cu, Mg y Si, las fases en equilibrio pueden diferir. La fase S (Al<sub>2</sub>CuMg) se forma cuando la proporción Cu:Mg es mayor que 2 y la proporción Mg: Si es mayor que 1.7. Cuando la relación Mg:Si ≈1.7, las fases Mg<sub>2</sub>Si y Al<sub>2</sub>Cu están presentes. Durante el proceso, las condiciones termomecánicas varían a través del cordón de soldadura, resultando en diferentes microestructuras. (8)

En la zona afectada térmomecanicamente (TMAZ) y el botón de soldadura (WN), la influencia de la deformación plástica y la agitación térmica desarrolla una estructura de granos finos recristalizados dinámicamente. (16)

Alejandro Echavarría en conjunto con Gustavo Orrego (2012) argumentan que en este tipo de aleaciones como es la AA2024 se puede presentar un mayor incremento en la resistencia a la tensión y en la resistencia a la cedencia en la deformación plástica luego del tratamiento térmico. Esto debido al envejecido natural que distingue a este tipo de aleaciones.

Además se menciona la secuencia de precipitación de la aleación AA2024 la cual se describe a continuación: Solución sólida sobresaturada  $\rightarrow$  arreglos desordenados de átomos de Cu y Mg  $\rightarrow$  zonas GP en forma de barras  $\rightarrow$  fase S' (Al<sub>2</sub>CuMg) en forma de tiras  $\rightarrow$  fase S (Al<sub>2</sub>CuMg)

Siendo sus precipitados típicos Al<sub>12</sub>Si [Mn, Fe]<sub>3</sub>, Mg<sub>2</sub>Si y en algunos casos Al<sub>3</sub>[Fe,Mn] o Al<sub>6</sub>[Mn,Fe]. Durante el tratamiento térmico los precipitados de hierro se transforman a Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe y de manganeso a Al<sub>20</sub>Cu<sub>2</sub>Mn<sub>3</sub>. La Figura 2.14 muestra los precipitados típicos de la aleación envejecida del AA2024. (19)



Figura 2.14 Precipitados típicos de la aleación AA2024 (8)

### 2.6.1 Partículas intermetálicas en AA2XXX

Debido a los elementos de aleación e impurezas en la serie 2xxx, la estructura de las partículas intermetálicas puede ser considerada como una de las más complejas entre todas las aleaciones de aluminio. La adición de

magnesio, en las aleaciones de la serie 2xxx, es a menudo usada para mejorar la resistencia. Mientras que la adición de litio a las aleaciones Al-Cu(Mg) es usada para mejorar los niveles de resistencia y de soldabilidad. (8)

Generalmente, los elementos de aleación de las series 2xxx, forman dos tipos de partículas intermetálicas en la matriz de aluminio: (8)

- Precipitados metaestables y estables de endurecimiento por envejecido (solubles): Precipitados finos esféricos o de placa coherente (pocos nanómetros de espesor) que se forman solo en el envejecido a bajas temperaturas o temperatura ambiente después del tratamiento térmico y temple. Estos son los principales mecanismos de endurecimiento debido a su tamaño pequeño. En un envejecido adicional, estas fases se engrosan hasta que estas transforman a fases incoherentes en equilibrio (alcanzando un tamaño de 1-10µm) las cuales contienen Cu o Mg, tal como las fases O-Al<sub>2</sub>Cu o S-Al<sub>2</sub>CuMg. Estas fases difieren de los precipitados primarios en que estos pueden ser completamente re-disueltos alrededor de los 515-550°C. Durante la recristalización, la precipitación/disolución simultánea de estas fases puede influenciar la estructura del grano resultante dependiendo de la condición inicial del material y del tipo de los precipitados. En la Tabla 2.7 se muestran las fases intermetálicas potenciales en aleaciones de aluminio de la serie 2xxx.
- Partículas constituyentes (insolubles primarias): Partículas que contienen Si, Fe o Mn, en adición con el Cu o Mg, tales como Al<sub>12</sub>(Fe, Mn)<sub>3</sub>Si, Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe o Al<sub>5</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>6</sub> (con un tamaño de 1-10μm). (8)

Ele me	Fases intermetálicas							
into								
Cu	Cu<2%	Cu>2%	Fe>>Si	Mg>1/2Si	Mn>>Fe	Mg <si< th=""></si<>		
	En solución sól.	Al₂Cu	Al₂Cu₂Fe o Al₀(Cu, Fe)	Al₂CuMg o Al₀CuMg₄	Al <sub>20</sub> Cu <sub>2</sub> Mn <sub>3</sub> o Al <sub>6</sub> (Cu, Fe, Mn)	Al₅Cu₂MgଃSiն o Alı₅>(Cu, Fe,Mn)₃Si₂		
Fe	Si>2Mg	Fe>:	>Si		Mn>0.1%			
	Al₀Fe₂Si o Al₅FeSi	Al7Cu2Fe o Al6(C	u, Fe) o Al₃FeSi	Al₀(Cu, Fe, Mn) o Al₁₅(Cu, Fe, Mn)₃Si₂				
Si	Si>Fe	Si <fe, mg="">Si</fe,>	Mg≈Si	Mn>0.1%	Si>>Mg+Fe			
	Al₅FeSi	Mg <sub>2</sub> Si	Al₅Cu2Mg8Si6	Al₁₅(Cu, Fe, Mn)₃Si₂	Si			
Mg	Mg<0.2%	Si>0.6Mg<1Mg	Si≈Mg	Si<<0.6Mg	Cu <mg< th=""></mg<>			
	En solución sól.	Mg₂Si	Al₅Cu₂Mg <sub>8</sub> Si <sub>6</sub>	Al₂CuMg	Al₀CuMg₄			
Mn	Mn<0.2%	Fe>Si	Fe <si< th=""><th colspan="3">Fe, Si&lt;<mn< th=""></mn<></th></si<>	Fe, Si< <mn< th=""></mn<>				
	solución sól.	Al <sub>6</sub> (Fe, Mn)	Al <sub>15</sub> (Cu,Fe,Mn) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub>	Al <sub>20</sub> Cu <sub>2</sub> Mn <sub>3</sub>				
Zn	Zn<2%	Zn>2%						
	En solución sól.	Al <sub>3</sub> Cu <sub>5</sub> Zn <sub>2</sub>						

Tabla 2.7 Fases intermetálicas potenciales en aleaciones AA2XXX (8)

Las aleaciones de la serie 2xxx difieren de las aleaciones de la serie 5xxx en que ellas alcanzan su resistencia a través del endurecimiento por precipitación. Basándose en la naturaleza del sistema Al-Cu, si la composición de la aleación es menor que 5% e.p. de Cu y es calentada hasta la región  $\alpha$  (515-550°C) para obligar a todo el cobre en la aleación a convertirse en solución que después templada, se convertirá en una solución sobresaturada. (8)

### 2.6.2 Clasificación de las zonas soldadas

La soldadura característica del proceso FSSW exhibe una morfología única en las zonas de soldadura que difiere de las zonas en los procesos de soldadura por fusión debido a la ausencia de una zona de fusión. Existen dos tipos de clasificación para las zonas soldadas en el proceso FSSW. La más usada (clasificación de Threadgill) está basada en zonas microestructurales. (18)

### 2.6.2.1 Clasificación de Threadgill

Threadgill ha clasificado las soldaduras en cuatro zonas microestructurales, las cuales son: Botón de la soldadura (WN, por sus siglas en inglés), zona termomecánicamente afectada (TMAZ, por sus siglas en inglés), zona afectada por el calor (HAZ, por sus siglas en inglés) y metal base (BM) como se muestra en la Error! Reference source not found. La zona del nugget se refiere a la región previamente ocupada por el herramental. En la literatura esta región es algunas veces referida como zona agitada o stirred zone (STZ, por sus siglas en inglés). La zona termomecánicamente afectada es la región trapezoidal cuyas bases lo forman el diámetro dado por las dimensiones del hombro y el diámetro del pin. La agitación del herramental durante el proceso provoca la formación de granos recristalizados dinámicamente, en la zona D y granos deformados plásticamente o recristalizados parcialmente en la zona C. Más allá de la TMAZ, una zona estrecha afectada por el calor puede observarse, donde se experimenta una disminución del campo térmico hasta llegar al metal base que no es afectado. La clasificación de las zonas descritas con anterioridad se puede observar en la Figura 2.15 (20)



Figura 2.15 Distribución de las zonas a lo largo de la muestra en el proceso de FSSW. (20)

### 2.7 Recristalización

Durante el procesamiento y fabricación de metales y aleaciones, algunas veces es necesario recalentar un metal trabajado en frío para ablandarlo, y de este modo incrementar su ductilidad. Si el material es recalentado a una temperatura suficientemente alta por un periodo de tiempo suficiente, la estructura del metal trabajado en frío irá a través de una serie de cambios llamados recuperación, recristalización y crecimiento de grano. (21)

Cuando un metal es trabajado en frío fuertemente, mucha de la energía de deformación gastada en la deformación plástica es almacenada en el metal en forma de dislocaciones y otras imperfecciones como son defectos puntuales. Así un metal endurecido por deformación tiene una energía interna más alta en comparación a uno que no ha sido deformado. (21)

#### 1) Recuperación

Cuando un metal trabajado en frío es calentado a una temperatura dentro del rango de temperaturas de recuperación el cual está por debajo del rango de temperaturas de recristalización, los esfuerzos internos en el metal son aliviados. Durante la recuperación, suficiente energía térmica es suministrada para permitir a las dislocaciones reacomodarse por sí mismas en configuraciones de energía menor. La recuperación de muchos metales

trabajados en frío produce una estructura de subgranos con límites de grano de bajo ángulo. Este proceso de recuperación es llamado poligonización, representado en la Figura 2.16, y a menudo es un cambio estructural que precede a la recristalización. La energía interna del metal recuperado es más baja que la del estado de trabajado en frío debido a que muchas dislocaciones son aniquiladas o movidas a configuraciones de energía menor por el proceso de recuperación. (21)



c) Poligonización de la red







#### 2) Recristalización

Una vez que se ha calentado un metal trabajado en frío a una temperatura lo suficientemente alta, granos nuevos y libres de deformación son nucleados en la estructura del metal recuperado y empiezan a crecer formando una estructura recristalizada. Después de un tiempo lo suficientemente largo a una temperatura a la cual la recristalización toma lugar, la estructura de trabajado en frío es completamente reemplazada con una estructura de grano recristalizado.

La recristalización primaria ocurre por dos mecanismos principales: núcleos aislados que pueden expandirse dentro de un grano deformado o un límite de grano original con alto ángulo que puede migrar a una región altamente deformada del metal. En cualquier caso, la estructura en el lado cóncavo del

límite móvil está libre de deformación y tiene una energía interna relativamente baja, mientras que la estructura en el lado convexo de la interfase móvil está altamente deformada con una alta densidad de dislocaciones y energía interna alta. (21)

Factores importantes que afectan el proceso de recristalización en metales y aleaciones son: acumulación de deformación previa del metal, temperatura, tiempo, tamaño de grano inicial y composición del metal o aleación. La recristalización de un metal puede tomar lugar a través de un rango de temperaturas, y el rango es dependiente de cierta manera de las variables anteriores. (21)

### 2.7.1 Recristalización dinámica

La recristalización dinámica ocurre durante la deformación a alta temperatura. El término "dinámica" se usa para distinguirla de la recristalización estática que puede ocurrir una vez acabada la deformación. Esta última es equivalente, en algunos aspectos, a la recristalización clásica que tiene lugar durante el recocido de los metales deformados en frío. La recristalización dinámica al igual que la clásica ocurre mediante nucleación y crecimiento de granos nuevos. (24)

La recristalización dinámica tiene una manifestación tanto mecánica como microestructural. La primera es una curva de fluencia. Microestructuralmente, puede producirse tanto refino como crecimiento de grano. (24)

Fernando Franco y colaboradores (2012) trabajaron con aleaciones ligeras de aluminio y magnesio unidas por el proceso de fricción agitación.

La aleación de aluminio utilizada fue AA 6261-T5, las uniones fueron hechas en una fresadora universal con diseño de juntas a tope con medidas finales de la pieza de 180 x 300 x 3 mm. Las variables del proceso que fueron modificadas en este análisis fueron la velocidad de rotación del pin (Vr) y la velocidad de avance (Va). Como se muestra en la Tabla 2.8.

Muestra	Vr (rpm)	Va (mm/min)
1500 A	1500	210
1500 B	1500	136
1500 C	1500	94
750 B	750	105
750 C	750	68
480 A	480	210
480 B	480	136
480 C	480	94

Tabla 2.8 Velocidades empleadas en el proceso (25)

Se emplearon dos herramentales con diseños diferentes para la unión de las placas; el primero un pin cilíndrico y otro cónico, ambos de acero grado herramienta con tratamiento térmico de temple y revenido y una dureza de 55HRC. Como se muestra en la Figura 2.18



Figura 2.18 Macrografías de las uniones empleando los dos tipos de pin. (25)

Se presentó un túnel de poros en la raíz del cordón en las juntas soldadas a una velocidad de rotación de 480 rpm con pin cónico, debido a la falta de calor suficiente para llevar a cabo la unión y esto repercutió en la prueba de tensión donde fallaron en la zona de agitación.

Se observó que al aumentar la velocidad de avance, para cada velocidad de rotación, hay un incremento en la resistencia a la tensión de la junta soldada, mostrado en la **Error! Reference source not found.** y por el contrario la ductilidad tiene un decremento.



Figura 2.19 Efecto de la velocidad de soldadura sobre la resistencia a la tracción (25)

Mientras que en la microestructura del metal base se aprecian granos equiaxiales grandes con precipitados coherentes en su interior, la zona agitada presenta granos finos y precipitados endurecedores resultantes de la recristalización dinámica, debido a las temperaturas alcanzadas en el proceso. Por su parte la zona termomecánicamente afectada cuenta con granos grandes alargados, mostrada en la Figura 2.20.



Figura 2.20 Microestructura encontrada en a) el límite de HAZ Y TMAZ, comparada con b) el metal base (25)

### 2.8 Técnicas de caracterización

### 2.8.1 Caracterización metalográfica

Una metalografía consiste en realizar un estudio de la microestructura del material, además que una vez realizada se conocen ciertas características de la aleación o material como lo es: tamaño de grano, la fase o fases características de la aleación, etc.

El procedimiento para llevar a cabo una metalografía es la siguiente:

- Corte del material: la orientación de la superficie a examinar es de suma importancia, ya que de acuerdo al corte que se realice sobre el material, la estructura se podrá observar de diferente manera. El método para cortar debe ser aquel que minimice la deformación y el calentamiento del área de corte, ya que en ambos casos esto podría afectar la superficie que se examina.
- 2. Desbaste: el desbaste se realiza con el fin de remover todo el material o imperfecciones que quedan sobre el corte, esto con el fin de dejar un área totalmente plana, es importante señalar que el proceso se debe realizar de la lija más gruesa a la más delgada, y siempre utilizando agua como refrigerante sobre el material.

- Pulido: la pieza a examinar debe de contar con un acabado superficial excelente (acabado espejo), esto se logra mediante la utilización de un abrasivo fino.
- 4. Ataque del material: consiste en utilizar un agente químico que reaccione con la superficie a examinar, la selección del agente químico varía según el material y sus características. (26)

La microscopía óptica constituye la primera y más básica de las etapas desarrolladas en el proceso de caracterización microestructural. Esta fase se basa principalmente en la observación del espécimen a estudiar por medio de un microscopio óptico compuesto por un sistema de iluminación, condensadores, filtros de luz, lente objetivo y ocular como componentes básicos, permitiendo mejoras y componentes extras que optimizan la calidad de la imagen obtenida. (16)

### 2.8.2 Microscopía electrónica de barrido

El fundamento del microscopio electrónico de barrido radica en que los electrones emitidos por un cátodo de tungsteno pasan a través de una columna en la que se ha hecho un vacío de alrededor de 10<sup>-7</sup> Torr. En ella, el haz inicial es concentrado por una serie de lentes electromagnéticas (condensadora, objetivo) desde unos 25000-50000nm hasta unos 10nm; es decir, su diámetro va disminuyendo hasta hacerse casi puntual. Al mismo tiempo, la intensidad de corriente se disminuye desde unos 10<sup>-14</sup> A hasta unos 10<sup>-10</sup>-10<sup>-12</sup> A.

El haz electrónico con estas últimas características, es decir puntual, es desplazado sobre toda la superficie de la muestra a modo de un pincel que iría barriendo la muestra con continuas idas y venidas. Esta movilidad del haz se consigue gracias a un sistema de bobinas de barrido situadas en la columna del instrumento.

En la interacción del haz electrónico con la superficie de producen electrones secundarios que, tras ser captados por un detector, son hechos incidir sobre un

centellador, donde cada electrón dará origen a varios fotones. Dichos fotones son dirigidos hasta un fotomultiplicador a través del cañón de luz y, ya en aquél, cada fotón dará origen a un fotoelectrón que, a través de una serie de electrodos con diferencias de potencial crecientes produce, mediante un efecto en cascada, gran cantidad de electrones secundarios originales o, dicho de otro modo, una amplificación de la información sobre la muestra suministrada de dichos electrones. Los electrones secundarios, finalmente, previo paso por un video amplificador, son dirigidos hacia un tubo semejante a un osciloscopio de rayos catódicos (ORC) sobre cuya pantalla se producirá la imagen. (27)

Un microscopio electrónico de barrido crea una imagen ampliada de la superficie de un objeto. No es necesario cortar el objeto en capas para observarlo con un MEB, sino que puede colocarse en el microscopio con muy pocos preparativos. El MEB explora la superficie de la imagen punto por punto, al contrario que el MET, que examina una gran parte de la muestra cada vez. Los microscopios electrónicos de barrido pueden ampliar los objetos 200.000 veces o más. Este tipo de microscopio es muy útil porque, al contrario que los MET o los microscopios ópticos, produce imágenes tridimensionales realistas de la superficie del objeto. (27)

## CAPÍTULO III DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA 3 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA

Debido a la creciente necesidad de implementar nuevos materiales en el campo aeronáutico que brinden ligereza y propiedades mecánicas óptimas en campo, surge de igual modo la necesidad de desarrollar un proceso de unión que cumpla con los requisitos de la industria aeronáutica y que además afecte lo menos posible las características originales del material.

Los procesos de arco aparecen en escena para estas aleaciones, arrojando resultados no tan favorables. Debido a la alta conductividad térmica y al bajo punto de fusión de las aleaciones de aluminio pueden producir fácilmente perforaciones en el material, así como agrietamientos a lo largo de la soldadura. Problemas más allá de los visuales, se cuenta con presencia de intermetálicos, debido a las temperaturas que se alcanzan con estos procesos, que afectan de manera directa las propiedades mecánicas de la unión.

Es así como en 1991 surge una alternativa a este problema, con un proceso que no alcanza la temperatura de fusión, sino que más bien solo alcanza un

estado de plasticidad, desarrollado para evitar este tipo de defectos, característicos de los procesos de arco.

El proceso FSSW, sucesor del también proceso en estado sólido FSW, tiene como principio crear una cierta cantidad de calor por fricción que pueda mantener el material a soldar en un estado plastificado con una temperatura adecuada y generar una presión adecuada en el punto de unión de manera que se pueda formar una unión confiable y de buenas características físicas y mecánicas.

En investigaciones recientes se han encontrado resultados muy similares, como lo es el tema del aumento de la dureza del material en la zona de la TMAZ, causada principalmente por la formación de precipitados de endurecimiento que al estar el material sometido a ciertos esfuerzos, se llegaría a una ruptura en esta zona.

### **CAPÍTULO IV**

### 4 CASO DE ESTUDIO

Se trabajó con una aleación de aluminio 2024-T3 con la composición química mostrada en la Tabla 4.1.

% Sn	%Mg	%Pb	%Zn	%Cu	%Ni	%Fe	%Mn	% Cr	% Ti	% Si	%AI
0.01	1.41	0.01	0.14	3.76	0.01	0.14	0.48	<0.01	0.02	0.11	Bal.

Tabla 4.1 Composición química de la aleación 2024-T3 con la que se trabajó.

El caso de estudio en esta monografía se llevó a cabo en dos etapas:

- 1) Proceso de soldadura fricción- agitación por puntos.
- 2) Caracterización de las uniones soldadas.

### 4.1 Primera etapa: Proceso de soldadura fricción-agitación por puntos

Placas de la aleación 2024-T3 con un espesor final de 2mm para de esta manera, ser unidas a traslape mediante el proceso de soldadura de fricciónagitación por puntos.

El diseño de los puntos se observa en la Figura 4.1, donde se muestran las medidas reales de la placa. El espaciamiento entre cada punto de soldadura fue de 2cm.



Figura 4.1 Diseño de la placa a soldar mediante el proceso FSSW. Vista Frontal.

El proceso de soldadura se llevó a cabo mediante un CNC, empleando el programa del equipo para llevar a cabo la unión, así como un herramental de carburo de tungsteno especial para esta soldadura que se describe en la Figura 4.2



Figura 4.2 Diseño y medidas del herramental empleado durante la unión visto de una manera longitudinal y frontal, respectivamente. Medidas dadas en mm (entre corchetes) y pulgadas.

Los parámetros del proceso se utilizaron de manera constante solo se varió la velocidad de rotación siendo diferente en cada uno de los puntos, como se muestra en la Tabla 4.2

No de punto	Penetración	Velocidad de	Tiempo de	Velocidad de
1.0	(mm)	rotación	permanencia	entrada
. m		(rpm)	(S)	(mm/min)
1	3	1500	5	40
2	3	1800	5	40
3	3	1200	5	40
4	3	1000	5	40
5	3	2100	5	40

Tabla 4.2 Parámetros empleados en la unión de las placas.

### 4.2 Segunda etapa: Caracterización de las uniones soldadas

### 4.2.1 Caracterización metalográfica

Las placas previamente unidas fueron cortadas con disco de diamante en una máquina Leco VC-500. Posteriormente, el montaje se llevó a cabo con baquelita en una montadora Struers. La etapa de desbaste se realizó en lijas de carburo de silicio grano 500, 800, 1000 y 1200 secuencialmente. Finalmente fueron pulidas de manera estática con alúmina de 1 µm por un tiempo aproximado de 30 minutos. Las muestras fueron llevadas a limpieza ultrasónica por 20 minutos para la eliminación de residuos de etapas anteriores.

Con un tiempo de permanencia de 20 segundos con ácido fluorhídrico, las muestras fueron atacadas químicamente para ser observadas al microscopio óptico.

En la Figura 4.3 se observan las diferentes zonas de la muestra 3, trabajada con 1200 rpm, en condición de ataque. En la imagen a) se muestra el mapeo a lo largo de la unión, donde es posible diferenciar las dos placas (superior e inferior) iniciales. Tanto en la zona de agitación como en la termomecánicamente afectada es posible diferenciar los granos recristalizados, así como los principales precipitados en el metal base y a lo largo de la unión. En el inciso b se observa la micrografía representativa de la zona del nugget donde la parte oscura es la parte de la muestra que estuvo en contacto directo con la herramienta; en el inciso c se observa una micrografía representativa de la zona termomecánicamente afectada donde se exhibe una combinación de granos recristalizados y algunos con deformación remanente del proceso de unión; mientras que en las micrografías de los incisos d y e corresponden a la zona de metal base, donde se observan granos libres de deformación, es decir, granos que no fueron afectados por el proceso.



Figura 4.3 Muestra 3 atacada químicamente con HF a) Mapeo de la unión.5x. b) zona agitada (nugget). 10x. c) Zona termomecánicamente afectada. 10x. d) Metal base. 10x. e) Metal base. 50x.

En la Figura 4.4, se observan las micrografías representativas de la muestra 4, trabajada a 1000 rpm, en condición de ataque. En el mapeo de la unión, inciso a, se observa una clara separación entre la placa superior e inferior, así como granos finos y recristalizados rodeando la parte deformada por el herramental. En el inciso b se observa la micrografía representativa de la zona del nugget donde en comparación con la muestra 4 se observa una menor área de granos recristalizados y deformados debido al proceso; en el inciso c se observa una micrografía representativa de la zona termomecánicamente afectada los granos deformados son más notorios en esta muestra; mientras que en las micrografías de los incisos d y e corresponden a la zona de metal base, donde se observan granos libres de deformación, es decir, granos que no fueron afectados por el proceso.



Figura 4.4 Muestra 4 atacada con HF a) Mapeo de la unión. 5x. b) Zona agitada (nugget). 10x c) Zona termomecánicamente afectada. 10x d) Metal base. 10x. d) Metal base. 50x.

En la Figura 4.5 se muestran las diferentes zonas a lo largo de la muestra 5, trabajada con 2100 rpm, en condición de ataque. En el mapeo de la unión en la imagen a, se observa la deformación causada por el proceso de soldadura así como la separación entre placas. Mientras que a lo largo de la zona agitada y de la termomecánicamente afectada se aprecian granos finos y recristalizados a causa de la deformación. En el inciso b se observa la micrografía representativa de la zona del nugget donde se observa un área de granos recristalizados y deformados; en el inciso c se observa una micrografía representativa de la zona termomecánicamente afectada donde se exhibe una combinación de granos recristalizados y algunos con deformación remanente del proceso de unión; mientras que en las micrografías de los incisos d y e corresponden a la zona de metal base, donde se observan granos libres de deformación.



Figura 4.5 Muestra 5 atacada químicamente con HF. a) Mapeo de la unión. 5x. b) Zona agitada (nugget). 10x. c) Zona termomecánicamente afectada. 10x. d) Metal base. 10x. e) Metal base. 50x.

### 4.2.2 Microscopía electrónica de barrido

Esta técnica se utilizó para conocer la composición de las fases, precipitados e intermetálicos presentes en el material. En la Figura 4.6 se observan las diferentes zonas presentes en la muestra 3, trabajada a 1200rpm, en condición de ataque. En las micrografías presentadas a lo largo de esta sección se muestran la morfología de los precipitados así como de las fases intermetálicas,

así mismo un análisis químico puntual en las diferentes áreas a lo largo de las muestras.



Figura 4.6 Imágenes por microscopía electrónica de barrido (SEM) de la aleación de aluminio 2024 unida por el proceso FSSW. A) Mapeo general de la muestra 50x. B) y C) Área media de la muestra 500x. D) Y E) Zona del metal base 500x. Ataque con ácido fluorhídrico.

En la Figura 4.7 se aprecia el análisis químico hecho a una partícula presente en el metal base de la muestra 3, en una zona con alto contenido de aluminio y un nivel considerable de cobre. Así mismo se examinó uno de las partículas presentes en la zona de agitación como se aprecia en la Figura 4.8 donde se aprecia una composición química similar a la partícula examinada en el metal base, es decir con niveles de aluminio y cobre muy similares.



Figura 4.7 Imagen y análisis obtenidos por microscopio electrónico de barrido de la zona del metal base.



Figura 4.8 Imagen y análisis obtenidos por microscopio electrónico de barrido de la zona de agitación.

### 4.3 Evaluación de dureza

Fue evaluada la propiedad de dureza en cada una de las muestras, se realizaron un total de cinco indentaciones por zona a lo largo de las muestras, observándose su comportamiento en la Figura 4.9. En cada una de las tres muestras se observa un patrón o comportamiento similar. El valor mínimo de dureza en cada una de las muestras se presentó en la zona termomecánicamente afectada. Siendo la muestra unida con 2100 rpm la que presentó el valor más bajo de dureza.



Figura 4.9 Perfiles de durezas de cada una de las muestras analizadas

# CAPÍTULO V CONCLUSIONES

### **5 CONCLUSIONES**

En base a la revisión bibliográfica se concluye que el proceso de FSSW es viable para realizar la unión a traslape de placas de aluminio 2024-T3 con 2 mm de espesor, utilizando los parámetros adecuados de proceso. El proceso FSSW ofrece ventajas sobre los procesos convencionales de soldadura para realizar este tipo de unión. El diseño de la herramienta así mismo, parámetros como la velocidad de rotación y tiempo de permanencia son vitales para la unión correcta del material.

En el análisis de las microestructuras de la soldadura de la aleación de aluminio 2024-T3, fueron identificadas tres zonas representativas del proceso las cuales son metal base, zona termomecánicamente afectada y la zona agitada o nugget de soldadura. En este sentido, todas las zonas exhiben la microestructura típica referida anteriormente en la bibliografía.

En cuanto a medición de dureza, el valor más bajo se presentó en la muestra 5, trabajada a 2100rpm, siendo éste 121 HV. La mejoría en la dureza en la TMAZ y en la SZ puede atribuírsele a la recristalización presente en estas zonas.

La falta de unión en las muestras, puede ser causada por la falta de calor de entrada en el proceso debido a la fricción causada por el herramental, es decir basados en el caso de estudio, se debieron modificar otras variables además de las revoluciones por minuto para ver la variación en la unión total de las placas.

### Bibliografía

1. Iwashita, T. US 6601751 B2 Japón, 2003.

2. Schilling, C & Dos Santos, J. US 6.722.556 B2 2004.

3. George E. Totten, D. Scott MacKenzie. Handbook of Aluminium Volume 1 Physical Metallurgy and Processes. 2003.

4. **ASM international.** ASM Handbook Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.

5. Davis, J. R. Aluminium and Aluminium Alloys. Ohio : ASM, 1993.

6. Mondolfo, L. F. Aluminium Alloys: Structure and Properties. London : s.n., 1976.

7. **Cobden, Ron.** Aluminium: Physical Properties, Characteristics and Alloys. [aut. libro] Training in Aluminium Application Technologies (TALAT). *TALAT lecture 1501*.

8. Attallah, Moataz. Friction Stir Welding of Alluminium Alloys. Lexington : Lambert, 2011.

9. Books, Charlie R. Heat Treatment, Structure and properties of Nonferrous Alloys. 1982.

10. Hatch, J. E. Aluminium: Properties and Physical Metallurgy. Ohio : ASM, 1984.

11. **ESAB.** [En línea] 02 de Septiembre de 2014. http://www.esab.es/es/sp/education/proceso-soldadura-friccion.cfm.

12. Don-Hyun, C., Byung-Wook, A., Chang-Young, L., Yun-Mo, Y., Keun, S., & Seung-Boo, J. Forrmation of intermetallic compounds in AI and Mg alloy interface during friction stir spot welding. s.l. : Elsevier, 2010.

13. Quinatan, K. J., Falla, R., Franco, F., de Sánchez, N. A., & Rodríguez, J. *Comportamiento Mecánico de Soldaduras de punto por Fricción-Agitación de la aleación de aluminio 6063-T5.*. s.l. : Rev. LatinAm. Metal Mat., 2012.

14. Zhaohua Zhang, Xinqui Yang, Jialong Zhang, Guang Zhou, Xiaodong Xu, Binlian Zou. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminium alloy. 2011, Sciencie Direct.

15. Materials, Woodhead Publishing in. Friction Stir Welding. 2010.

16. Díaz, Arheli Zaid Rodríguez. Técnicas de caracterización microestructural aplicadas a un compuesto de matriz metálica de aluminio reforzado con partículas de carburo de silicio unido por el proceso de soldadura por fricción (FSW). Saltillo : s.n.

17. **R. Falla, K.J.** Propiedades mecánicas de soldadura por fricción agitación de punto en aleación de aluminio AA6063-T5. 2012.

18. Colligan, K. Material flow behavior during friction stir welding of aluminium. 1999.

19. Echavarría, Alejandro. Metalurgía Básica de Algunas Aleaciones de Aluminio Extruidas o Laminadas.

20. **R. S. Mishra, Z. Y. Ma.** *Friction Stir Welding and Processing.* s.l.: Materials Science and Engineering, 2005.

21. Smith, William F. Principles of materials science and engineering.

22. Slide Player. [En línea] [Citado el: 25 de Marzo de 2015.] http://slideplayer.es/slide/1078020/#.

23. Stress Relief. Herring, Daniel H. 2011.

**24. Omar, Anas Al.** Caracterización dinámica de dos aceros microaleados de medio carbono mediante ensayos de compresión a alta temperatura. 1996.

**25. Fernando Franco, Hugo Sánchez, Diana Betancourt. 2009.** *Soldadura por fricción-agitación de aleaciones ligeras.* 

26. Capitulo IV Metalogrfía.

**27. Renau-Piqueras, Jaime. Valencia : s.n.** *Principios básicos del microscopio electrónico de barrido.* 

28. Hertzberg, R.W. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. 1996.

**29.** ASM. Aluminium Properties and physical metallurgy. 1984.

### ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA (%E.P.) DE LA ALEACIÓN
COMERCIAL AA2024 (8) 13
TABLA 2.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE AA2024-T3 13
TABLA 2.3 DESIGNACIÓN DE TRATAMIENTOS POSTERIORES AL
CONFORMADO. (9) 14
TABLA 2.4 SUBDIVISIONES DE TEMPLE T (9) 14
TABLA 2.5 COMPARACIÓN DEL RANGO DE TEMPERATURAS DEL
TRATAMIENTO TÉRMICO DE SOLUCIÓN Y DE TEMPERATURA
2XXX (9)
2,000 (0)
TABLA 2.6 VARIACIÓN EN RANGO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA EN
ALEACIONES DE LA SERIE 2XXX. (ELEMENTO/ %PESO)
TABLA 2.7 FASES INTERMETÁLICAS POTENCIALES EN ALEACIONES
AA2XXX (8)
TABLA 2.8 VELOCIDADES EMPLEADAS EN EL PROCESO (25) 40
TABLA 4.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ALEACIÓN 2024-T3 CON LA
QUE SE TRABAJÓ
TABLA 4.2 PARÁMETROS EMPLEADOS EN LA UNIÓN DE LAS PLACAS.

### ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 DIAGRAMA AL-CU (8) 11	1
FIGURA 2.2 EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS (7)	1
FIGURA 2.3 EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN EN LA SOLDABILIDAD Y ANODIZADO (7)	2
FIGURA 2.4 PROCESO FSW (11) 17	7
FIGURA 2.5 PROCESO FSSW (12)	9
FIGURA 2.6 APARIENCIA DE LA SOLDADURA FRICCIÓN AGITACIÓN POR PUNTOS Y SECCIÓN TRANSVERSAL (13)	Э
FIGURA 2.7 DISEÑO DE LA PISTOLA DE SOLDADURA DE FRICCIÓN- AGITACIÓN POR PUNTOS (FSSW) (14)	1
FIGURA 2.8 SISTEMA ROBOTIZADO DE LA SOLDADURA DE FRICCIÓN- AGITACIÓN POR PUNTOS. (13)	2
FIGURA 2.9 MICROSCOPÍA ÓPTICA DE LA MUESTRA REALIZADA A UNA VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE 1541 RPM B) BM C) HAZ D) TMAZ E) SZ (14)	5
FIGURA 2.10 LÁMINA DE AA6063-T5 CON TRES PUNTOS DE SOLDADURA (FSSW). (17)	7
FIGURA 2.11 A: ZONA DE AGITACIÓN (SZ), B: ZONA	
---	
TERMOMECÁNICAMENTE AFECTADA (TMAZ), C: ZONA	
TÉRMICAMENTE AFECTADA (HAZ), D: METAL BASE (17)	
FIGURA 2.12 PERFIL DE DUREZA CON VARIANTES DE VELOCIDAD DE	
ROTACIÓN. (17)	
FIGURA 2.13 PERFIL DE DUREZA REALIZADO A LO LARGO DE LAS	
MUESTRAS. (17)	
FIGURA 2.14 PRECIPITADOS TIPICOS DE LA ALEACIÓN AA2024 (8) 32	
FIGURA 2.15 DISTRIBUCIÓN DE LAS ZONAS A LO LARGO DE LA	
MUESTRA EN EL PROCESO DE FSSW. (20)	
FIGURA 2.16 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA	
POLIGONIZACION (22)	
FIGURA 2.17 EFECTO DEL TRABAJADO EN FRÍO SOBRE	
PROPIEDADES MECÁNICAS (23)	
FIGURA 2.18 MACROGRAFIAS DE LAS UNIONES EMPLEANDO LOS	
203 TIFOS DE FIN. (23)	
FIGURA 2.19 EFECTO DE LA VELOCIDAD DE SOLDADURA SOBRE LA	
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (25) 41	
HAZY TMAZ COMPADADA CON R) EL METAL RASE (25)	
FIGURA 4.1 DISEÑO DE LA PLACA A SOLDAR MEDIANTE EL PROCESO	
FSSW. VISTA FRONTAL	
FIGLIDA 42 DISEÑO V MEDIDAS DEL HEDDAMENITAL EMDLEADO	
DURANTE LA UNIÓN VISTO DE UNA MANERA LONGITUDINAL V	
BOILT IN ONION VIOLO DE ONA MANTENA ECHONODIMAE I	

## Resumen autobiográfico

Autor: Nayeli Becerra Zamarripa Lugar de nacimiento: Saltillo, Coahuila, México Fecha de nacimiento: 03 de Mayo de 1992 Padre: Humberto Becerra González Madre: Martha Zamarripa Guel

Grado a obtener: Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial Monografía: Soldabilidad de la aleación de aluminio 2024 por el proceso de soldadura de fricción-agitación por puntos (FSSW) empleada en la industria aeronáutica.

## Títulos obtenidos

Ingeniera en Materiales: Instituto Tecnológico de Saltillo (2009-2014)