

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LA HERRAMIENTA SOBRE LA  
MICROESTRUCTURA DE LAS UNIONES DEL MATERIAL COMPUESTO  
AI-SiC MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-  
AGITACIÓN**

**POR**

**MARTIN SANDOVAL CASTAÑEDA**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA  
SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAH. ABRIL DE 2016**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LA HERRAMIENTA SOBRE LA  
MICROESTRUCTURA DE LAS UNIONES DEL MATERIAL COMPUESTO  
AI-SiC MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-  
AGITACIÓN**

**POR**

**MARTIN SANDOVAL CASTAÑEDA**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA  
SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAH. ABRIL DE 2016**

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**

**Gerencia de Desarrollo Humano**

**División de Estudios de Posgrado**

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **“INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LA HERRAMIENTA SOBRE LA MICROESTRUCTURA DE LAS UNIONES DEL MATERIAL COMPUESTO AI-SiC MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN”**, realizada por el alumno **MARTIN SANDOVAL CASTAÑEDA**, con número de matrícula 15ES-192 sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

**El Comité Tutorial**

---

**Dra. Argelia Fabiola Miranda Pérez**  
Tutor Académico

---

**Dra. Alejandra Hernández  
Rodríguez**  
Tutor en Planta

---

**Dr. Felipe de Jesús García  
Vázquez**  
Asesor

---

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 **MARTÍN SANDOVAL CASTAÑEDA**, una vez leída y revisada la Monografía titulada **INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LA HERRAMIENTA SOBRE LA MICROESTRUCTURA DE LAS UNIONES DEL MATERIAL COMPUESTO AI-SiC MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN**, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno 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 11 días del mes de Abril del año 2016

---

**Dr. Efraín Almanza Casas**  
Presidente

---

**Dra. Gladys Yerania Pérez Medina**  
Secretario

---

**Dra. Argelia Fabiola Miranda Pérez**  
Vocal

# AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo ha sido sólo posible con la ayuda y dirección de un sinnúmero de personas que de manera directa o indirecta han contribuido al mismo.

Al momento de reflexionar sobre a quién debo agradecer mi pensamiento va en primera instancia a México y a su gente, a su generosidad y a su fortaleza; la patria, mi patria, de la cual me alejé durante tanto tiempo y la cual me recibió como si jamás me hubiera ido.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Corporación Mexicana de Investigación de Materiales; en particular a la Gerencia de Desarrollo Humano de COMIMSA y en general a las demás gerencias que apoyan la formación de nosotros los estudiantes.

Quiero mencionar especialmente a aquellos que de alguna manera u otra estuvieron involucrados en este proyecto; en primer lugar quiero agradecer a mi tutora académica la Dra. Argelia F. Miranda Pérez, a la Dra. Alejandra Hernández Rodríguez y al Dr. Felipe de Jesús García Vázquez, que también formaron parte del comité tutorial. No podría dejar de mencionar el agradecimiento hacia mis maestros por la generosidad con que compartieron

sus conocimientos y el tiempo extra que nos dedicaron siempre que lo necesitamos. Gracias también a los Ingenieros Carlos Germán Torres Olveda y Pedro Antonino de la Cruz Martínez cuyo trabajo hizo posible la manufactura de las herramientas utilizadas en el caso de estudio desarrollado

Finalmente agradezco a todos mis compañeros estudiantes de especialidad, maestría y doctorado por el apoyo que en un momento u otro y con bastante generosidad me regalaron. A ustedes, y a todos ustedes a quienes no menciono, mi más profundo agradecimiento por todo lo que me han brindado.

# DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a Ti Madre, aunque ya no estás con nosotros; a ti Papá y a ustedes mis hermanos Olga, Elizabeth, Mauro, y a ti especialmente Armida por tu bondad y amor hacia toda tu familia.

Va este trabajo dedicado también a México y a su gente, con la esperanza de contribuir a hacer luz en estas horas negras de su existencia.

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIA.....	iii
ÍNDICE.....	iv
SÍNTESIS.....	vii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Planteamiento del problema.....	4
1.5 Aportación tecnológica.....	4
1.6 Alcance y delimitaciones.....	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1 Materiales Compuestos.....	5
2.1.1 Antecedentes.....	5
2.1.2 Tipos de refuerzos.....	6
2.1.2.1 Refuerzo de partículas.....	7



2.1.2.2	Refuerzo de fibras .....	7
2.1.2.3	Refuerzo Estructural.....	7
2.1.3	Tipos de materiales de la matriz .....	8
2.1.3.1	Matriz cerámica .....	8
2.1.3.2	Matriz polimérica .....	9
2.1.3.3	Matriz carbono-carbono .....	9
2.1.3.4	Matriz Metálica .....	10
2.1.4	Materiales compuestos de matriz de aluminio .....	12
2.1.4.1	Designación.....	12
2.1.4.2	Tipos de materiales compuestos.....	13
2.1.4.3	Interfaz .....	14
2.2	Proceso FSW.....	15
2.2.1	Antecedentes.....	15
2.2.1.1	Principios del proceso .....	15
2.2.1.2	Herramientas.....	17
2.2.1.3	Parámetros del proceso FSW .....	18
2.2.2	Deformación del material y formación de la junta .....	19
2.2.2.1	Proceso termomecánico.....	19
2.2.2.2	Deformación plástica.....	20
2.2.2.3	Deformación en compósitos de matriz de aluminio .....	22
2.2.3	Efectos del proceso FSW en aleaciones de aluminio .....	22
2.2.4	Defectos en las zonas de unión mediante el proceso FSW .	24
2.2.5	Influencia de la geometría de la herramienta FSW .....	26
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA .....		32
CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO .....		35

4.1 Metodología .....	35
4.2 Parámetros .....	42
4.3 Caracterización.....	43
4.4 Resultados.....	45
4.2.1 Flujo de material durante el proceso de unión .....	45
4.2.2 Microdureza .....	49
4.2.3 Desgaste de la herramienta.....	52
Conclusiones .....	54
Bibliografía .....	56
Listado de tablas.....	60
Listado de figuras.....	61
Resumen autobiográfico .....	64

# SÍNTESIS

El presente trabajo recopila información correspondiente al estado del arte de los materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con partículas de carburo de silicio (SiC), y del efecto de la geometría de la herramienta que se utiliza en el proceso de soldadura por fricción agitación para la unión de los materiales mencionados. Adicionalmente, se describe la metodología y los resultados del caso de estudio dónde se unieron placas de material compuesto de matriz de aluminio reforzadas con 20% de partículas de carburo de silicio. Para el caso de estudio se fabricaron herramientas y se modificó el diseño original de una de ellas para analizar la posibilidad de fabricar una herramienta económica con características de autoprotección al desgaste. Las muestras unidas fueron caracterizadas mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, y se les realizaron perfiles de microdureza para analizar la influencia de la geometría sobre la microestructura de la unión y sus efectos en las propiedades mecánicas de las uniones.

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

Aun cuando el uso de materiales compuestos se remonta a tiempos prehistóricos, el avance tecnológico que surgió a raíz de la Revolución Industrial llevó al desarrollo de sofisticados objetos, herramientas, sistemas y materiales los cuáles, al paso del tiempo, requirieron a su vez de nuevos avances en las ciencias, de cambios paradigmáticos, de nuevas tecnologías y de nuevos materiales (1; 2).

Desde la aparición y aplicación industrial de las aleaciones metálicas y de los materiales compuestos manufacturados ha sido necesario contar con un método de unión que ofrezca juntas sin defectos. En el caso de aleaciones de aluminio, el proceso tradicional de unión por fusión no ha sido el más adecuado para la tarea de unir estos materiales dado que el proceso produce defectos en la región de la unión (3) como: a) fracturas producidas por los esfuerzos y deformaciones generados durante el proceso de solidificación y contracción térmica y, b) porosidad ocasionada debido a que el charco de soldadura del aluminio puede retener un alto contenido de hidrógeno, el cuál no puede escapar a la superficie líquida debido a la rápida velocidad de enfriamiento

(solidificación) del aluminio (4). La llegada a principios de los años 90 del proceso de soldadura por fricción agitación (FSW por sus siglas en inglés) -un proceso de unión de estado sólido- resolvió los problemas inherentes a la unión por fusión de aleaciones de aluminio (5), pero aún existen problemas cuando se trata de soldar mediante este proceso un material compuesto de matriz metálica (MMC por sus siglas en inglés) (2).

Particularmente, la aplicación de compuestos de matriz metálica en campos que van desde la ingeniería civil hasta la industria aeroespacial requiere no solamente de procesos que produzcan uniones de materiales compuestos libres de defectos, sino también de técnicas que anticipen el comportamiento mecánico del material ante una aplicación específica.

Desde esta perspectiva, esta investigación se enfoca al análisis del estado del arte de los materiales compuestos de matriz metálica y del proceso FSW para su unión, y de la influencia sobre la microestructura del material compuesto en función de la geometría de la herramienta y de su composición química.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Revisar el estado del arte y analizar la literatura actual referente a la unión de materiales compuestos de matriz de aluminio reforzada con partículas de carburo de silicio (Al-SiC) mediante el proceso de soldadura por fricción-agitación para identificar la influencia de la geometría de las herramientas sobre la microestructura de dicha unión.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Revisar y recopilar la literatura y el estado del arte relevante a los materiales compuestos y al proceso FSW.
- Revisar y analizar la literatura concerniente a la herramienta para unir del proceso FSW.

- Analizar los cambios microestructurales mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido en la unión de materiales compuestos de matriz metálica mediante el proceso de soldadura por fricción-agitación y en función de la geometría de la herramienta utilizada.
- Analizar en base a la bibliografía revisada los cambios sobre las propiedades mecánicas en la región de la unión de MMC en función de la geometría de la herramienta FSW.

### **1.3 Justificación**

La industria aeroespacial, que usa de manera extensa aleaciones de aluminio y el proceso FSW para la unión de éstas, ha encontrado en los materiales compuestos de matriz de aluminio un sustituto superior a las aleaciones de aluminio; sin embargo, aun cuando FSW es comúnmente utilizado en la unión de aleaciones de aluminio, la mayor barrera para soldar MMC por fricción-agitación (y por lo tanto lo hace inaccesible a un mayor número de industrias) es el rápido desgaste de la herramienta (2). Los estudios hasta ahora realizados acerca de herramientas FSW y materiales MMC se concentran en el desgaste de la herramienta y los defectos que el mismo produce en la unión; sin embargo, son pocos y dispersos los estudios que se enfocan sobre la influencia que tienen las herramientas FSW en la microestructura de las uniones de MMC.

Debido al continuo desarrollo y avance en el diseño de las herramientas de soldadura por fricción-agitación, existe una gran variedad de geometrías en el mercado disponibles para la unión aleaciones y de materiales compuestos. Las diferencias microestructurales que produce una herramienta u otra deben ser consideradas al momento de seleccionar una geometría determinada para una aplicación específica, pues el conocimiento de la microestructura permite anticipar el comportamiento mecánico del material ante las condiciones de trabajo a las que se verá expuesto.

Dado que no existe una colección consolidada de resultados comparativos entre los resultados de diferentes geometrías y/o composición

química, el presente trabajo ofrece una visión conjunta de los cambios microestructurales en las uniones de materiales compuestos en función de las herramientas usadas.

#### **1.4 Planteamiento del problema**

La soldadura por fricción-agitación produce cambios microestructurales en la unión de materiales compuestos de matriz metálica. La interacción intergranular entre los constituyentes de los MMC en las zonas de la unión se ve afectada por las características del proceso de unión por FSW. El propósito de la investigación es identificar la influencia de la geometría y del material de la herramienta usada sobre la microestructura de la unión.

#### **1.5 Aportación tecnológica**

El presente trabajo recopila información concerniente a la influencia sobre la microestructura de la unión de materiales compuestos de matriz metálica en función de las herramientas de soldadura por fricción-agitación usadas. Además, la descripción de las propiedades físicas y mecánicas afectadas por los cambios en la microestructura es importante porque permite predecir los efectos y posibles repercusiones en el rendimiento y desempeño esperado del componente.

#### **1.6 Alcance y delimitaciones**

Se enfoca específicamente el presente trabajo a los materiales compuestos de matriz metálica de aluminio reforzada con partículas de carburo de silicio, y a las herramientas FSW usadas para la unión de estos materiales.

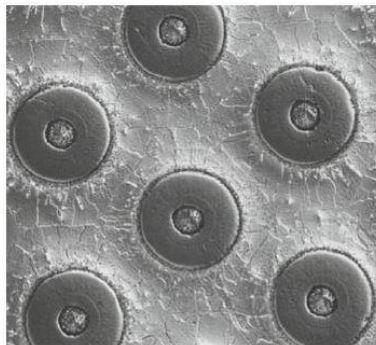
Se estudia además la influencia sobre la microestructura de la unión del material antes mencionado y las propiedades físicas y mecánicas de la región afectada por el proceso.

# CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

## 2.1 Materiales Compuestos

### 2.1.1 Antecedentes

Los materiales compuestos son aquellos que consisten de un elemento de refuerzo distribuido en una matriz o fase continua (véase Figura 2.1). Las características propias de estos materiales provienen de las propiedades de sus constituyentes, de su geometría, su arreglo, y de las propiedades de las interfaces entre los constituyentes (4).



*Figura 2.1 Compuesto de matriz de Ti con fibras de SiC recubiertas con una aleación de B-Ti (4)*



Estos materiales se pueden clasificar de acuerdo al material de la matriz o de acuerdo a la naturaleza del refuerzo. De acuerdo al material de la matriz los compuestos se dividen en materiales de matriz cerámica, polimérica, metálica y materiales de carbono-carbono. De acuerdo al tipo de refuerzo se tienen materiales compuestos con refuerzo de partículas, fibras y laminados. El diseño de un componente en particular determina las propiedades requeridas del material compuesto y, así, las propiedades de los constituyentes se pueden combinar para lograr nuevas propiedades que satisfagan los requerimientos para determinada aplicación. Por ejemplo, las cerámicas, que por naturaleza son frágiles, pueden ser endurecidas por un refuerzo de fibras de carburo de silicio o de alúmina; de la misma manera, metales inherentemente dúctiles pueden alcanzar una mayor rigidez mediante la incorporación de un refuerzo de cerámica (4).

### 2.1.2 Tipos de refuerzos

Como se mencionó anteriormente, una clasificación simple se puede hacer de acuerdo al tipo de refuerzo: refuerzo de partículas, refuerzo de fibras, y refuerzo estructural. Los posibles arreglos de la fase dispersa se muestran en la Figura 2.2:

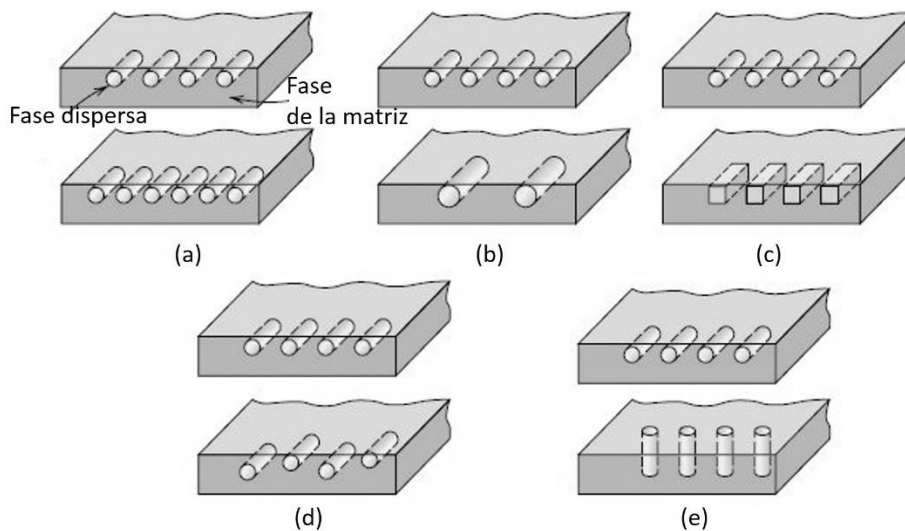


Figura 2.2 Representación esquemática de varios tipos de arreglos de la fase dispersa en una matriz. (a) cantidad; (b) tamaño; (c) geometría; (d) distribución; (e) orientación (6).

### **2.1.2.1 Refuerzo de partículas**

Las partículas pueden ser grandes y son usadas en todos los tipos de materiales. Por ejemplo, el carburo cementado está compuesto de partículas duras de cerámica de carburo refractario como carburo de tungsteno, incrustadas en una matriz metálica como cobalto o níquel. Este tipo de compuestos se usa principalmente para herramientas de corte para aceros endurecidos (6).

Los metales y aleaciones metálicas pueden ser reforzados y endurecidos por la dispersión uniforme de partículas finas de un material muy duro e inerte. La fase dispersa puede ser metálica o no metálica; con frecuencia son usados óxidos. El mecanismo de reforzamiento incluye interacciones entre las partículas y dislocaciones dentro de la matriz, tal como en el endurecimiento por precipitación. El efecto de reforzamiento por dispersión no es tan pronunciado como por el endurecimiento por precipitación; sin embargo, el reforzamiento es retenido a elevadas temperaturas y por periodos extendidos de tiempo porque las partículas dispersas son seleccionadas para ser no-reativas con la matriz (6).

### **2.1.2.2 Refuerzo de fibras**

Las fibras continuas metálicas, cerámicas, de vidrio y poliméricas, con una relación longitud/diámetro grande, son usadas para reforzar varios tipos de matrices. Un material duro y fuerte como lo es un cerámico en forma fibrosa tiene menos defectos que limiten su resistencia que el mismo material en un volumen mayor; así, mientras menor es el diámetro de la fibra entonces mayor es la resistencia a la fractura (4).

### **2.1.2.3 Refuerzo Estructural**

Un compuesto estructural se compone normalmente de materiales compuestos y materiales homogéneos, y sus propiedades dependen de las propiedades de sus constituyentes y del diseño geométrico de los mismos. Los

compuestos laminares y los paneles de emparedado son de los más comunes compuestos estructurales.

Los compuestos laminares son virtualmente isotrópicos en un plano bidimensional pues esto se debe a la unión de varias capas de un compuesto altamente anisotrópico colocadas de tal manera que la dirección de alta resistencia varía de una capa a otra. Los paneles de emparedado consisten de dos hojas o capas fuertes y rígidas que están separadas por un material central. Estas estructuras combinan relativamente altas resistencias y rigidez con bajas densidades (6).

### **2.1.3 Tipos de materiales de la matriz**

Los materiales compuestos se pueden definir también en base a la naturaleza de la fase continua, la matriz. Se mencionan a continuación algunas de las características de los diferentes tipos de materiales compuestos de acuerdo al material de la matriz.

#### **2.1.3.1 Matriz cerámica**

En general los materiales cerámicos (CMC, por sus siglas en inglés) tienen un muy importante –y por lo tanto muy atractivo- conjunto de propiedades: alta resistencia y rigidez a temperaturas muy altas, son químicamente inertes, tienen una baja rigidez y también una baja densidad entre otros. Sin embargo, este conjunto de propiedades está enlazado íntimamente a una grave desventaja, esto es, sufren de una falta total de dureza. Son propensos a fallas catastróficas cuando se encuentran defectos internos o en su superficie, o cuando son expuestos a choques térmicos; también se dañan muy fácilmente durante la fabricación y/o servicio. Por lo anterior, es lógico que una de las consideraciones más importantes en los CMC sea el endurecimiento del cerámico mediante la incorporación de fibras reforzantes y de esta manera hacer uso de las propiedades de alta resistencia a alta temperatura y resistencia a la corrosión.

Las aplicaciones aeroespaciales de los CMC incluyen componentes para aviones, helicópteros, misiles y vehículos de reentrada como el transbordador espacial. Aplicaciones no aeroespaciales incluye insertos de herramientas de corte, filtros de compuestos cerámicos, aplicaciones de conversión de energía y sistemas militares (1).

### **2.1.3.2 Matriz polimérica**

Los materiales poliméricos reforzados con fibra (PMC, por sus siglas en inglés) son ampliamente usados como materiales estructurales en aplicaciones de relativamente baja temperatura (4).

Los PMC reforzados con fibra de vidrio son usados en una gran variedad de industrias: desde artículos deportivos hasta construcción civil y aplicaciones aeroespaciales. Algunos tanques y buques de la industria de procesos químicos son hechos de resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio y las aplicaciones militares van desde cascos ordinarios hasta carcazas para los motores de cohetes (1).

### **2.1.3.3 Matriz carbono-carbono**

Los compuestos de carbono-carbono (C-C, por sus siglas en inglés) consisten de una matriz de carbono reforzada con fibras continuas de carbono. Los compuestos C-C son usados para la nariz y las orillas del transbordador espacial; como boquillas y conos de salida de cohetes de combustible sólido, y como puntas de nariz y escudos térmicos para misiles balísticos. El material también ha sido usado en sistemas de freno de aviación donde el esfuerzo de torsión, el cuál es altamente friccional, genera un calor intenso elevando la temperatura de los frenos hasta 500 °C. De la misma manera, los primeros revestimientos de los reactores de fusión termonuclear también usan materiales C-C para combatir cargas térmicas intensas. Para los sistemas de exploración espacial, los compuestos C-C han sido propuestos para aplicaciones en radiadores en sistemas de manejo de calor, carcasas de turbinas, turbo bombas y bridas (4).

#### 2.1.3.4 Matriz metálica

En los materiales compuestos de matriz metálica (MMC, por sus siglas en inglés) las propiedades mecánicas dependen de la cantidad, tamaño, forma y distribución del refuerzo, aparte de las propiedades mecánicas del material de la matriz y de la naturaleza de la interfaz. Por definición, un material compuesto requiere una cantidad de refuerzo ( $>1\%$  vol) de un tamaño ( $>1\ \mu\text{m}$ ) que permite a este constituyente soportar una carga y no solamente actuar para controlar el movimiento de dislocaciones, como en los materiales reforzados por dispersión. La forma del refuerzo es tan importante en la determinación de la capacidad de carga que los compuestos han sido clasificados de acuerdo a ésta: a) compuestos de refuerzo de fibra continua y discontinua y b) compuestos reforzados por partículas o por whiskers. La relación de aspecto generalmente caracteriza la forma. En compuestos de fibra continua, la carga es aplicada directamente a la matriz u la fibra. En compuestos de fibra discontinua o en compuestos de refuerzo de partículas, la carga es transmitida al refuerzo a través de la matriz (7).

Los MMC son una clase de material con potencial para una amplia variedad de aplicaciones estructurales y de manejo térmico. Estos materiales son capaces de soportar límites de operación de mayor temperatura que sus contrapartes metálicas y pueden ser adaptadas para mejorar la resistencia, rigidez, conductividad térmica, resistencia al desgaste y a la termofluencia (creep) (8).

En los MMC, la matriz es una aleación monolítica (usualmente una aleación no ferrosa de baja densidad) y el refuerzo consiste de adiciones de carbono, metálicas o cerámicas de alto rendimiento. El refuerzo, continuo o discontinuo, puede constituir desde un 10 a 70% del compuesto. Dentro de los refuerzos de fibra continua se encuentra el grafito, carburo de silicio, boro, óxido de aluminio y metales refractarios. Los refuerzos discontinuos consisten principalmente de carburo de silicio en forma de whiskers, partículas de carburo

de silicio, alúmina y diboruro de titanio, además de fibras cortas o fragmentadas de alúmina o grafito (7).

#### **2.1.3.4.1 Matriz de titanio**

El titanio se usa como matriz metálica debido a la buena resistencia específica a temperatura ambiente y moderadamente elevada y su excelente resistencia a la corrosión. Dado que el titanio retiene su resistencia a más altas temperaturas que el aluminio, ha sido usado incrementalmente como un reemplazo del aluminio en estructuras en aviación y misiles debido a que las velocidades de operación de estos objetos han aumentado de subsónico a supersónico (7).

#### **2.1.3.4.2 Matriz de magnesio**

Los compuestos de matriz de magnesio están siendo desarrollados para explotar esencialmente las mismas propiedades que proveen los MMC de matriz de aluminio: alta rigidez, peso ligero y bajo coeficiente de expansión térmica (CTE, por sus siglas en inglés). En la práctica, la elección entre aluminio y magnesio como matriz es usualmente hecha en base al peso versus resistencia a la corrosión. El magnesio es aproximadamente dos tercios tan denso como el aluminio, pero es más activo en un ambiente corrosivo. El magnesio tiene una conductividad térmica más baja, lo cual es algunas veces un factor en su selección. En los MMC de magnesio se pueden encontrar fibras continuas Gr/Mg para estructuras espaciales, fibras cortas  $Al_2O_3/Mg$  para componentes de motores, y SiC discontinuas o  $B_4C/Mg$  para componentes de motores y materiales de empaquetamiento electrónico de baja expansión. Las aleaciones de la matriz incluyen AZ31, AS91, ZE41, QE22, y EZ33. Métodos de procesamiento son paralelos a aquellos usados para las contrapartes de MMC de aluminio (7).

#### **2.1.3.4.3 Matriz de cobre**

Los compuestos de matriz de cobre han sido producidos con refuerzos de fibra continua de tungsteno, carburo de silicio y grafito. De éstos, los MMC de cobre de fibra continua de grafito son los que han sido más estudiados. El

cobre tiene buena conductividad térmica, pero es pesado y tiene pobres propiedades metálicas a elevadas temperaturas. Los MMC de grafito/cobre tienen el potencial para ser usados en el manejo térmico de componentes electrónicos, paneles de radiador de satélite y estructuras avanzadas de aeroplanos (7).

#### **2.1.3.4.4 Matriz de aluminio**

La mayoría del trabajo comercial en MMC se ha enfocado en el aluminio como el metal de la matriz. La combinación de peso ligero, resistencia a factores ambientales y útiles propiedades mecánicas ha hecho a las aleaciones de aluminio muy populares; estas propiedades también hacen al aluminio muy adecuado para su uso como matriz metálica. El punto de fusión del aluminio es suficientemente alto para satisfacer muchos requerimientos aplicaciones, pero suficientemente bajo para hacer el procesamiento del compuesto razonablemente conveniente. También, el aluminio puede acomodar una variedad de agentes reforzantes. Aunque mucho del trabajo inicial en MMC de aluminio se concentró en fibras de tipo continuo, la mayoría del trabajo actual se enfoca en MMC de aluminio de refuerzo discontinuo (partículas o whiskers) debido a su mayor facilidad de manufactura, bajos costos de producción y propiedades relativamente isotrópicas. Los compuestos de alta productividad, los cuales son más caros, son producidos con refuerzos de fibra continua. En el extremo opuesto del espectro costo/productividad están los compuestos metálicos fundidos de refuerzo de partículas. Entre estos dos tipos se encuentran los compuestos de medio precio, incluyendo aquellos producidos por las técnicas de infiltración de preforma y metalurgia de polvos (PM, por sus siglas en inglés) (7; 8; 9) .

#### **2.1.4 Materiales compuestos de matriz de aluminio**

##### **2.1.4.1 Designación**

Dado que la producción de los MMC de aluminio es mayor que todas las otras aleaciones combinadas, la Asociación de Aluminio (AA) desarrolló un sistema de designación estándar que fue adoptada por el Instituto de

Estándares Nacional Americano (ANSI, por sus siglas en inglés). ANSI 35.5-1992 indica que los MMC de aluminio se identifiquen como se muestra a continuación:

Matriz/refuerzo/%volumen de la forma

Por ejemplo, 2124/SiC/25w describe la aleación AA-registrada 2124 reforzada con 25%vol de whiskers de carburo de silicio; 7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/10p es la aleación 7075 reforzada con 10 %vol de partículas de alúmina; 6061/SiC/47f es la aleación 6061 reforzada con 47 %vol de fibras continuas de SiC; y A356/C/05C es una aleación de fundición con 5 %vol de fibras de grafito recortadas (7).

#### 2.1.4.2 Tipos de materiales compuestos

De acuerdo a la clasificación de Chawla (9), existen tres tipos de MMC:

- i. MMC reforzados con partículas
- ii. MMC reforzados con fibras cortas o con whiskers
- iii. MMC reforzados con fibras continuas u hojas

La Figura 2.3 muestra los tres tipos mayores de MMC más los MMC laminados donde el refuerzo de las láminas es de fibras continuas (9).



Figura 2.3 Representación esquemática de diferentes tipos de MMC acorde al tipo de refuerzo (9)

La Tabla 2.1 muestra ejemplos de algunos refuerzos importantes usados en MMC así como sus relaciones de aspecto (longitud/diámetro) y diámetros.

Tabla 2.1 Refuerzos típicos usados en MMC (9)

Tipo	Aspecto	Diámetro, $\mu\text{m}$	Ejemplos
Partícula	1-4	1-25	SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , BN, B <sub>4</sub> C, WC
Fibra corta o whisker	10-10000	1-5	C, SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub>
Fibra continua	>1000	3-150	SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , C, B, W, Nb-Ti, Nb <sub>3</sub> Sn



Los MMC con refuerzo de partículas tienen una especial importancia por las siguientes razones:

- Son más baratos comparados con los MMC reforzados con fibras continuas.
- Pueden ser usadas técnicas de procesamiento metalúrgico convencional tales como fundición o metalurgia de polvos, seguidas por un procesamiento secundario convencional por rolado, forjado y extrusión.
- Uso a más altas temperaturas que metales no reforzados.
- Módulo elástico y resistencia a la tensión mejorados.
- Un incremento en la estabilidad térmica.
- Mejor resistencia al desgaste.
- Propiedades isotrópicas en comparación con compuestos reforzados con fibras.

Los MMC obtenidos a partir del proceso de fundición del metal líquido son un poco más baratos de producir que los compuestos producidos por metalurgia de polvos. Existen dos tipos de MMC obtenidos por fundición:

- Compuestos fundidos con refuerzo local
- Compuestos fundidos en la forma de moldura de refuerzo uniforme con una matriz de aleación forjada. Tales molduras compuestas son forjadas y/o extruidas, seguido por un rolado u otras operaciones de conformado (9).

#### **2.1.4.3 Interfaz**

El término interfaz en los materiales compuestos se refiere a la fase de delimitación entre el refuerzo y la matriz a través de la cual hay una discontinuidad en la composición química, el módulo elástico, el coeficiente de expansión térmica, y/o propiedades termodinámicas tales como el potencial químico. La interfaz es muy importante en los compuestos debido a que el área interfacial por unidad de volumen es muy grande (9). Los procesos de

fabricación de compuestos crean interfaces entre materiales inherentemente disímiles (e.g., fibras cerámicas y matrices metálicas). La incompatibilidad de los materiales y las condiciones severas de procesamiento generalmente necesitadas para la fabricación de compuestos crean interfaces que existen en un estado de no-equilibrio (4).

## **2.2 Proceso FSW**

### **2.2.1 Antecedentes**

El proceso de soldadura por fricción agitación (FSW, por sus siglas en inglés) fue inventado por Wayne Thomas en 1991 en el Instituto de Soldadura en el Reino Unido. El proceso FSW ha sido aplicado a materiales ligeros y aleaciones, y también en aceros y aceros inoxidables con excelentes resultados.

La unión por FSW no requiere de material de aporte por lo tanto cualquier material ligero o aleación de composición similar puede ser unido sin que la compatibilidad y composición química del metal soldado represente un problema mayor. Las principales ventajas de FSW son baja distorsión, ausencia de distorsiones relacionadas a la fusión de metal y una unión muy resistente; además, los problemas comunes de la soldadura por fusión como agrietamiento por solidificación y porosidad son evitados porque la unión ocurre por debajo del punto de fusión del material.

El uso del proceso FSW incluye aplicaciones comerciales y militares. Algunas instituciones que usan el proceso incluyen Boeing, Airbus, Lockheed Martin, NASA, y la Naval de EU entre otros. Las aplicaciones van desde estructuras de cubierta para embarcaciones, vagones ferroviarios, fuselajes y estructuras secundarias, hasta disipadores de calor, tanques de combustible para vehículos aeroespaciales y partes de carrocería de automóviles (10)

#### **2.2.1.1 Principios del proceso**

Como puede verse en la Figura 2.4, en el proceso convencional de FSW la herramienta está compuesta de un vástago, un hombro y un pin. La

herramienta gira sobre su eje, desciende y el pin es incrustado en el material base, el hombro viaja sobre la superficie del material base y el contacto entre éstos genera un calor de fricción en su interfaz. El pin genera calor por fricción y además por el trabajo plástico que realiza al girar en el interior del metal base (11).

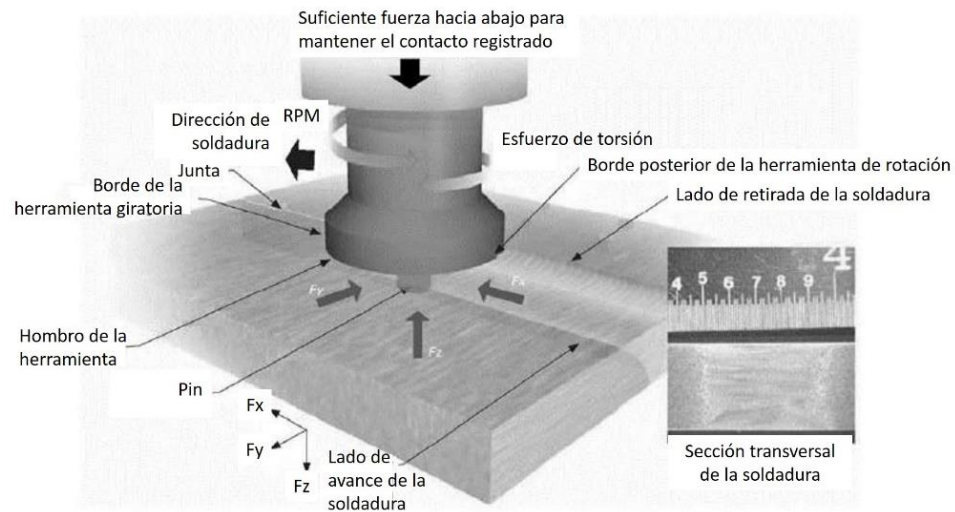


Figura 2.4 Esquema del proceso FSW (11)

La herramienta tiene tres funciones principales: a) calentar el material base, b) mover el material para producir la unión y c) contener el material caliente que se encuentra debajo del hombro de la herramienta. El calentamiento local reblandece el material alrededor del pin, el cual combinado con la translación de la herramienta produce un movimiento de material base desde el frente del pin hacia atrás del pin (2).

El proceso puede dividirse en tres etapas: la etapa de inserción, la etapa de recorrido y la etapa de retirada. Durante la etapa de inserción la herramienta y el material se encuentran a temperatura ambiente, cuando el hombro hace contacto con el material y el pin ha penetrado completamente, el calor friccional generado por la herramienta eleva la temperatura necesaria para el flujo plástico; una vez que la herramienta empieza a viajar el calor generado por la fricción y el trabajo plástico es suficiente para mantener un reblandecimiento

que permite al material fluir alrededor del pin (etapa de recorrido) lo cual produce la junta; una vez que se completa el proceso de unión se retira la herramienta (etapa de retirada) (1, 2).

#### **2.2.1.2 Herramientas**

La herramienta en el proceso FSW es quizás el componente más crítico para lograr una junta sana en la unión de materiales base. Las ventajas del proceso han hecho que el proceso tenga un amplio éxito comercial en la unión de aleaciones de aluminio y otros materiales ligeros; sin embargo, el mayor obstáculo para la unión de materiales más duros por este proceso es el severo esfuerzo y el desgaste al que la herramienta se ve sometida cuando se unen materiales como aceros y aleaciones de titanio; por lo tanto, la aplicación comercial del proceso a estos materiales se ve limitada por el alto costo de la herramienta y un ciclo corto de vida útil (12).

En el diseño de las herramientas FSW es necesario tener en cuenta el material y la geometría de la herramienta, el material a ser soldado y las metas de desempeño requeridas. Algunos de los materiales comúnmente usados para la fabricación de herramientas FSW incluyen acero grado herramienta, nitruro de boro cúbico policristalino (PCBN), carburo de tungsteno y, para algunas aplicaciones de importancia crítica, se pueden utilizar herramientas cubiertas de diamante. La geometría de la herramienta afecta el flujo de material plastificado, así como el movimiento traslacional y rotacional de la herramienta; por lo tanto, algunos factores importantes a considerar en la geometría son el diámetro del hombro y la geometría del pin, la cual incluye su forma y dimensiones (2), (13), (12). Algunos ejemplos de herramientas típicas del proceso FSW se muestran en la siguiente Figura 2.5:

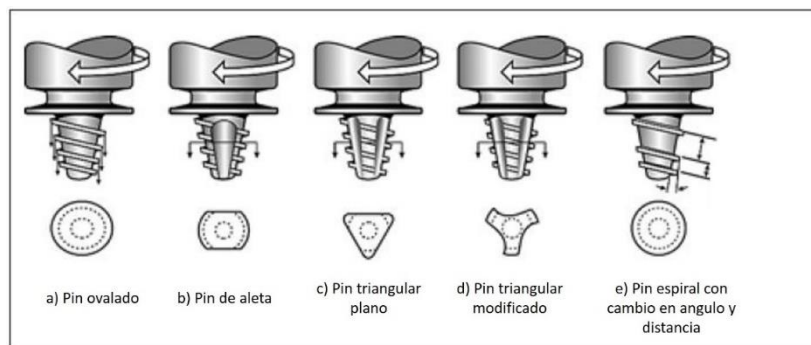


Figura 2.5 Algunas herramientas típicas del proceso FSW.

La Tabla 2.2 muestra algunos de los materiales, geometrías y variables de herramientas usadas para unir materiales compuestos (12).

Tabla 2.2 Material de herramienta, geometrías y variables

Material de trabajo	Material de la herramienta	Forma de la herramienta y tamaño	Parámetros de operación	Notas
6061-T6 Al + 20% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 5 y 6 mm de espesor	Acero grado herramienta AISI (62 HRC)	DH: 19mm FP: CRH DP: 6-3mm	500-2000 rpm 60-540 mm/m 1° Inclinación	No desgaste en 150-300mm, dependiente de parámetros
Al 359 + 20%SiC, 4mm	Acero grado herramienta AISI (62 HRC)	DH: 19mm FP: CRH DP: 6-3mm LP: 3-6mm	500-1000 rpm 360 y 660 mm/m	
Al 359 + 20%SiC, 4mm	Acero grado herramienta AISI	DH: 19mm DP: 6-3mm	1000 rpm 60-54 mm/m	
Al-10 wt %TiB <sub>2</sub> , 6mm	Acero al alto C, alto Cr (60-62 HRC)	DH: 16mm FP: C, CR, O, OR, H, HR	2000 rpm 30 mm/m	Eficiencia de la junta: 78.9-99.5%
Al-15 wt %Mg <sub>2</sub> Si, 6mm	Acero H13	DS: 18 mm FP: CirR LP: c5-7mm	710-1400 rpm 125 mm/m	Eficiencia de la junta: 80-98%
AA 6061-(3-7)%TiC, 6mm	Acero al alto C, alto Cr	PS: C, CR, H, HR, OR	30-135 mm/mm	Eficiencia de la junta: 72-114%

DH: Diámetro del hombro; FP: forma del pin; DP: diámetro del pin; LP: longitud del pin; C: cuadrado; CR: cuadrado reducido; O: octagonal; OR: octagonal reducido; H: hexagonal; HR: hexagonal reducido; Eficiencia de la junta es la relación entre la resistencia a la tensión de la junta y la resistencia a la tensión del material base

### 2.2.1.3 Parámetros del proceso FSW

Una importante ventaja del proceso FSW es la alta calidad y la repetibilidad de los resultados una vez que los parámetros del proceso son establecidos correctamente y monitoreados durante el proceso de unión. En general, de acuerdo con K. J. Colligan, los parámetros del proceso completo se

pueden dividirse en variables del diseño de la herramienta, variables del equipo y otras variables (11), véase Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Variables del proceso

<b>Variables del diseño de la herramienta</b>	<b>Variables del equipo</b>	<b>Otras variables</b>
Materiales del hombro y pin	Velocidad de avance	Material del soporte
Diámetro del hombro	Velocidad de rotación	Dimensiones del soporte
Diámetro del pin	Fuerza de inserción o profundidad	Dimensiones del material base
Longitud del pin	Ángulo de inclinación de la herramienta	Propiedades del material base
Rosca		
Características de la geometría		

Todas estas variables determinan el resultado del proceso de unión del material. El proceso afecta las propiedades de la junta principalmente a través de la generación y disipación de calor, por lo tanto, es necesario prestar atención primordial a la selección de parámetros para obtener el rendimiento esperado de la unión.

## **2.2.2 Deformación del material y formación de la junta**

### **2.2.2.1 Proceso termomecánico**

Una vez que el pin penetra el material y viaja a lo largo de la línea de la unión, este material se calienta por fricción interfacial e interna y se produce una unión por extrusión, forjado y agitación del material en contacto con el hombro y el pin. Esencialmente, el hombro y el pin ablandan el material termomecánicamente y entonces separan el material siendo procesado por el viaje del pin a través del material. El material fluye alrededor del pin y entonces es forjado en la orilla trasera de éste. Este proceso de separar y soldar ocurre continuamente por la acción rotatoria del pin y por la acción de compactación/contención del hombro. Esta operación transitoria de separación/unión ocurre durante y antes de que la orilla trasera del hombro se

alejamiento de la unión procesada. La región plastificada transitoria se une inmediatamente y se forma una unión de estado sólido a medida que la herramienta se aleja (5).

Visto como la interacción entre los tres parámetros principales (i. e. velocidad de rotación, velocidad de avance, fuerza axial) el proceso FSW parece un proceso relativamente simple; sin embargo, la formación de la junta depende de un ambiente térmico específico, lo cual determina los parámetros apropiados para alcanzar las constricciones metalúrgicas impuestas durante el procesamiento. FSW ha sido identificado como un proceso termomecánico y como un proceso de deformación de trabajo en caliente dado que se basa en calor y flujo de material para iniciar el reblandecimiento y el desplazamiento de un volumen finito de material (el material en contacto directo con la herramienta). Este material es entonces forzado a fluir y formar una junta de estado sólido (11).

#### **2.2.2.2 Deformación plástica**

Durante el proceso FSW el material se somete a una intensa deformación plástica a temperatura elevada, lo cual generalmente resulta en la generación de granos recristalizados finos y equiaxiales. Esta microestructura de granos finos produce buenas propiedades mecánicas en las soldaduras FSW. Juntas de una mejor calidad se asocian con un flujo intenso tridimensional de material.

Todas las actividades de procesamiento implican una combinación de deformación y de transferencia de calor donde, dependiendo del método de procesamiento, se produce una variación en la microestructura. Para un proceso termomecánico como FSW, las variaciones en los parámetros del proceso son acompañadas por variaciones en la deformación y la característica de transferencia de calor, con las consiguientes variaciones en la microestructura. La Figura 2.6 presenta las diferencias en la macroestructura soldada de una aleación AA356 utilizando la misma herramienta FSW con diferentes parámetros de funcionamiento. Como es evidente, dependiendo de

las condiciones de procesamiento la microestructura difiere drásticamente con los consiguientes cambios en la macroestructura (14).

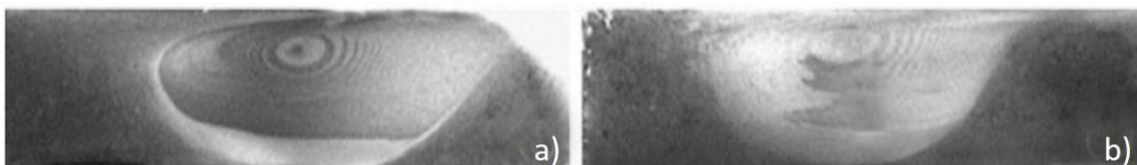


Figura 2.6 Macroestructura de una aleación AA356 unida por FSW usando la misma herramienta con diferentes velocidades de rotación y avance

De acuerdo con P. Vilaca y W. Thomas, las estructuras metalúrgicas típicas presentes en la zona procesada de uniones FSW se muestran en la Figura 2.7. Junto a la zona central termomecánicamente afectada (TMAZ, por sus siglas en inglés) se encuentra la zona afectada por el calor (HAZ, por sus siglas en inglés) y el material base material no afectado (BM, por sus siglas en inglés) (5). Vilaca y Thomas consideran la zona recristalizada como parte de la TMAZ. Sin embargo, J. F Dos Santos et al distinguen el centro de la soldadura o zona de agitación (SZ, por sus siglas en inglés) de la TMAZ. De acuerdo con ellos, la SZ son granos finos equiaxiales que resultan de una recristalización dinámica; en contraste, la TMAZ es una zona afectada por menores niveles de deformación y temperatura en comparación con la zona central (Figura 2.8) (11).

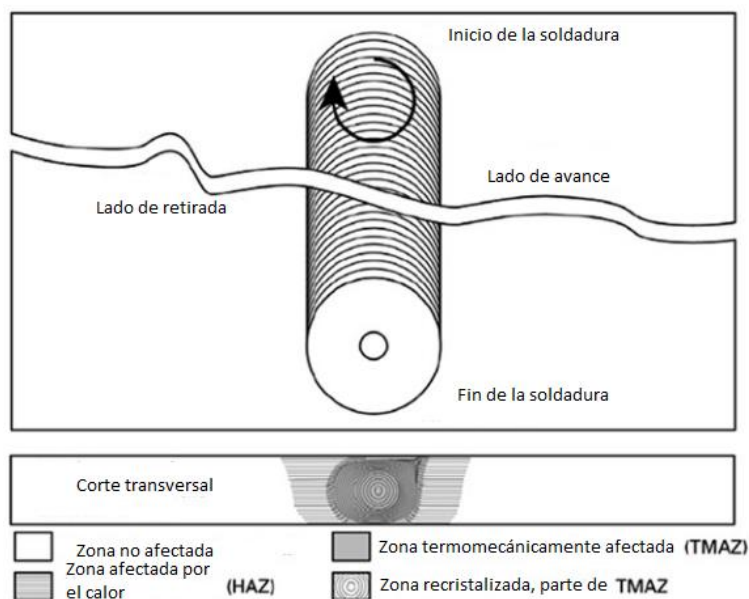


Figura 2.7. Zonas de la unión FSW





Figura 2.8. Zonas de la unión FSW

### 2.2.2.3 Deformación en compósitos de matriz de aluminio

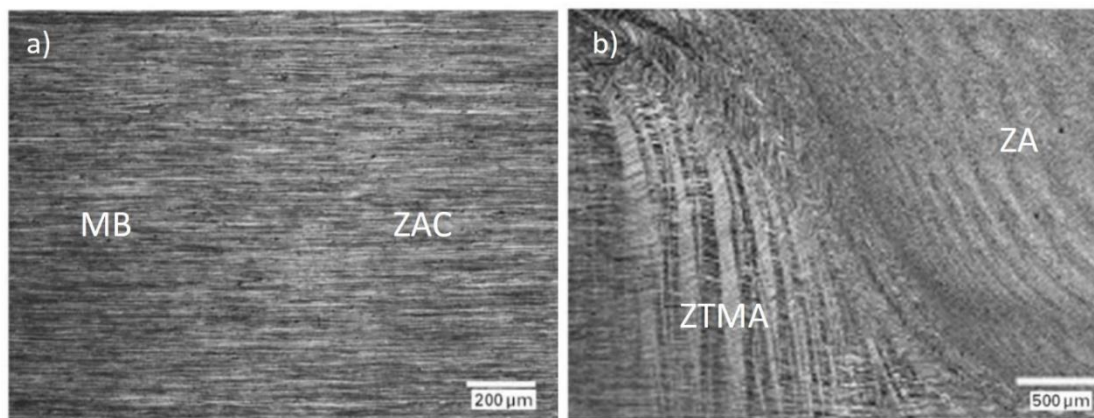
En cuanto a los materiales compuestos de matriz de aluminio (AMC, por sus siglas en inglés), la introducción del refuerzo desempeña un papel importante en cuanto al comportamiento mecánico y envejecimiento térmico del material. Los cambios micro-composicionales que ocurren durante los procesos de formación termomecánicos de estos materiales pueden causar cambios sustanciales en las propiedades mecánicas tales como ductilidad, tenacidad y resistencia a la corrosión. El desempeño satisfactorio de un material compuesto depende críticamente de su integridad, la cual depende de la calidad de la interfaz entre el material base y el refuerzo. A nivel micro, el gradiente de concentración local alrededor del refuerzo puede ser muy diferente a la concentración nominal de la matriz, y esto se debe al intento del material de deformarse durante el procesamiento. Esto juega un papel crucial en los eventos microestructurales de segregación y precipitación que ocurren en la interfaz matriz/refuerzo del compuesto (15) (16).

### 2.2.3 Efectos del proceso FSW en aleaciones de aluminio

En las aleaciones de aluminio el diámetro de la zona de agitación es típicamente un poco más grande que el diámetro del pin y mucho menor que el diámetro del hombro y se extiende típicamente también hasta el fondo de la unión.

La macroestructura fuera de la zona de agitación generalmente presenta una área adyacente a la SZ donde ocurre una deformación plástica severa del material, donde la estructura alargada de los granos en el material base

presente en la mayoría de las placas laminadas pueden ser rotadas hasta 90°. Las propiedades mecánicas son locales y específicas a cada una de estas regiones; así, por ejemplo, se tiene que perfiles de dureza tomados transversalmente a la junta pueden ser tomados como indicación de los cambios en la microestructura y respectivas propiedades mecánicas. Normalmente las propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio reforzadas por precipitación tienden a deteriorarse en las zonas de la unión y, generalmente, dependen de la disolución o engrosamiento de partículas de segunda fase. Las macrografías en la Figura 2.9 muestran un segmento de unión típico, representativo del plano transversal a la dirección de la soldadura FSW de aluminio con la identificación respectiva de las zonas de soldadura (11).



*Figura 2.9 a) Metal base y zona afectada por el calor, b) Zona termomecánicamente afectada y zona de agitación*

Investigación desarrollada por Mishra (2004), Venkateswarlu (2004) y otros ha demostrado que aspectos como la dureza, microestructura, recristalización, presencia de precipitados y dislocación difieren en las distintas zonas FSW, pero además también son diferentes en el grado en el que ocurren de acuerdo al tipo de aleación de aluminio y al tipo de procesamiento de la misma. Así por ejemplo se tiene que la microestructura de la SZ es equiaxial y muy fina, pero varía en grado de acuerdo a la aleación y a los parámetros FSW. Se han observado además diferentes tipos de precipitados a lo largo de las diferentes zonas FSW, los cuales dependen esencialmente de los elementos aleantes presentes (11).

#### **2.2.4 Defectos en las zonas de unión mediante el proceso FSW**

El proceso FSW puede producir uniones libres de imperfecciones y ser reproducidas con total garantía de calidad; sin embargo, algunas imperfecciones pueden surgir debido a un mal diseño de herramientas, a un desarrollo y establecimiento inadecuado de los parámetros de proceso, o un incorrecto control de los parámetros clave durante la operación de soldadura o procesamiento. Por ejemplo, insuficiente agitación del material, inadecuada preparación de la superficie, penetración incompleta del pin, una carga axial inadecuada (control de fuerza) o un inadecuado control de la posición (5).

Una de las mayores ventajas del proceso FSW es la ausencia de defectos asociados con la soldadura por fusión. En efecto, al ser un proceso de estado sólido, los defectos tales como porosidad y agrietamiento no ocurren cuando se unen materiales ligeros como aleaciones de aluminio, y esto se debe a que no ocurre fusión del material base durante el proceso de unión. Sin embargo, dado que FSW es un proceso de trabajo en caliente y que existen zonas distintas en la región de la unión, esto significa que existe el potencial de que ocurra un desequilibrio entre estas zonas y por lo tanto se vuelve susceptible a la formación de fallas.

La formación de fallas puede ocurrir como ya sea como consecuencia de un desequilibrio en el flujo de material, o factores geométricos asociados con la posición de la herramienta en relación con la junta. En condiciones óptimas se dice que se alcanza un balance de masa, en términos de volumen de material y energía. Esto facilita un procesamiento de volumen constante al mismo tiempo que se asegura un impacto mínimo en la microestructura existente y en muchos casos las propiedades de la junta FSW se acercan mucho a aquellas del material base.

Típicamente, para los procesos de trabajo en caliente, se requiere energía en forma de calor para reducir la resistencia del material a la deformación. Este calor al mismo tiempo facilita activamente el cambio microestructural, por ejemplo, recristalización, engrosamiento y el

fortalecimiento o la disolución de precipitados, de reorientación de granos y de crecimiento de los mismos.

Para poder lograr un balance de masa en el proceso FSW se requiere prevenir un flujo insuficiente de material, esto es una condición de insuficiente calor en la soldadura que produce formaciones de huecos o vacíos o falta de unión del material agitado con el metal base; o una condición de soldadura muy caliente, que puede generar un vuelco de material, colapso del nugget de soldadura, o la degradación de las propiedades mecánicas de la junta.

Otro tipo de defectos que se pueden producir son las fallas geométricas que están relacionadas con el diseño geométrico de la junta y la posición o ajuste de la herramienta relativo a la junta. Además de las fallas de flujo y geométricas existe la posibilidad de que se presenten rastros de óxido dentro del botón de soldadura (1). La siguiente figura (Figura 2.10) muestra los distintos tipos de defectos que se pueden presentar en las uniones FSW

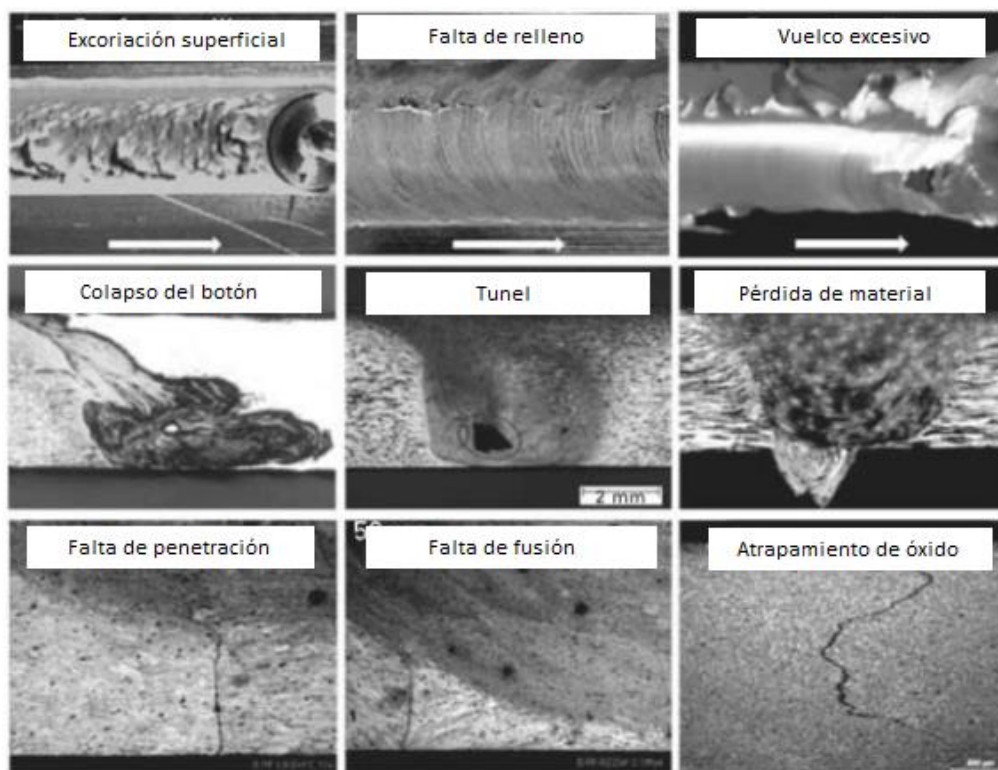


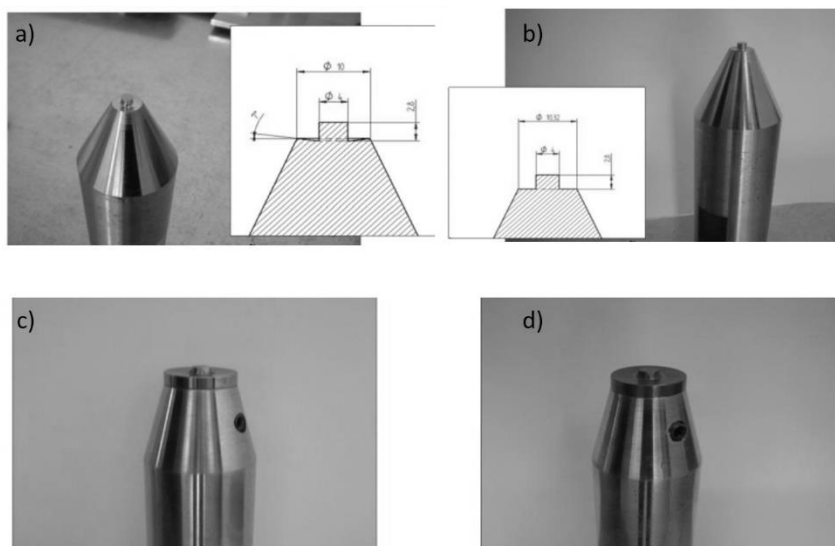
Figura 2.10 Defecto en las uniones FSW

### **2.2.5 Influencia de la geometría de la herramienta FSW**

Como se mencionó anteriormente, un cambio en las condiciones de procesamiento producen una alteración drástica en la microestructura de la región. Estos cambios en las condiciones de procesamiento se refieren típicamente a cambios en los parámetros del proceso tales como velocidad de rotación y avance de la herramienta; sin embargo, buena parte de la investigación hecha hasta el momento se centra en los cambios que se producen en la región de la unión cuando se modifican los parámetros de operación o en el desgaste que se produce en la herramienta como resultado de procesamiento en una ventana de parámetros de operación y poco énfasis se ha puesto en determinar cómo la geometría de la herramienta afecta la microestructura de la región de la unión.

Bhadeshia et al (12) sostienen que la geometría afecta la tasa de generación de calor, la fuerza transversal, el torque y el ambiente termomecánico experimentado por la herramienta. El flujo de material plastificado en la pieza de trabajo es afectado por la geometría de la herramienta así como por el movimiento lineal y rotacional del movimiento de la herramienta. Algunos factores importantes son el diámetro del hombro, el ángulo de la superficie del hombro, la geometría del pin incluyendo su forma y tamaño y la naturaleza de las superficies de la herramienta.

En 2014 Guisepe Casalino et al investigaron los efectos de la geometría y del recubrimiento del hombro de la herramienta en los defectos, la microestructura y la microdureza de la unión a tope de una aleación de aluminio 5754H11. En esta investigación se unieron a tope placas de 3mm de espesor y se usaron cuatro diferentes herramientas que diferían en la geometría y en el tratamiento térmico del hombro. Se observó la microestructura de la región de la unión con microscopía óptica y se hizo microdureza y medición de tamaño de grano. Las diferentes geometrías se pueden observar en la siguiente Figura 2.11:



*Figura 2.11 Geometrías usadas. a) Hombro cónico pequeño; b) hombro plano pequeño; c) herramienta de carburo con hombro grande; d) herramienta de carburo con hombro grande recubierto*

Algunos de los resultados del uso de las diferentes geometrías se reflejan en la apariencia de la soldadura, pues la geometría de la herramienta del inciso a) produjo una apariencia lisa mientras que la geometría de la herramienta en el inciso b) fue sensible a cambios en los parámetros. En cuanto a microdureza, se encontró que ésta varía en las diferentes regiones de la soldadura pero no es atribuible en este caso a la geometría de la herramienta sino al engrosamiento y disolución de precipitados. En cuanto al tamaño de grano, la recristalización típica de FSW generó granos finos y equiaxiales con una variación de 7 a 10  $\mu\text{m}$  y no fue afectada por la geometría ni la condición de la superficie del hombro. En las zonas TMAZ y HAZ la forma del grano varió en las direcciones verticales y horizontales (definidas con respecto a la dirección de la soldadura). Por lo tanto, en esas zonas los granos fueron alargados y su tamaño fue afectado por las características de la herramienta. La zona TMAZ se caracterizó por una estructura altamente deformada para todas las herramientas. Los granos alargados del metal base fueron deformados en un patrón de flujo ascendente alrededor del botón de soldadura. El tamaño vertical no varió significativamente entre la TMAZ y HAZ. Las conclusiones en este estudio fueron que el hombro cónico produjo una junta regular con una

superficie lisa y casi libre de vuelco; la geometría de hombro plano fue sensible a los parámetros de proceso; la herramienta con el hombro recubierto produjo una unión casi libre de defectos; el tamaño del hombro influyó en el tamaño de las zonas microestructurales y perfiles de dureza; y, por último, el tamaño del grano en la zona TMAZ fue sensible al hombro de la herramienta (17).

Otro importante trabajo que se enfoca también a las aleaciones de aluminio es el de Krzysztof Krasnowsky et al (2014). En la experimentación se usaron tres tipos de herramientas con diferentes geometrías del pin y diferentes superficies del hombro, y además dos configuraciones de unión (sólo un lado y doble lado). Se demostró que todos los tipos de herramientas produjeron uniones de alta calidad y libres de defectos, sin embargo los mejores rendimientos en el desempeño de la tensión fueron producidos por la herramienta convencional y Triflute. El diseño de la junta también influyó en las propiedades mecánicas pues las juntas dobles mostraron propiedades mecánicas más bajas debido a la mayor transferencia de calor durante el segundo pase. Los cambios en las propiedades mecánicas son el reflejo de los cambios en la microestructura, en particular, el reblandecimiento del botón de soldadura fue asociado con una recuperación dinámica intensa que produjo granos casi libres por completo de dislocaciones. El material base fue Al6082 y las herramientas usadas se muestran en la siguiente Figura 2.12, donde N1 es una herramienta convencional con pin redondo de rosca y hombro de geometría helicoidal; N2 es una herramienta Triflute con pin redondo de rosca, con tres muescas y hombro de geometría helicoidal; y por último N3 es una herramienta simple con un pin cilíndrico liso y hombro liso.

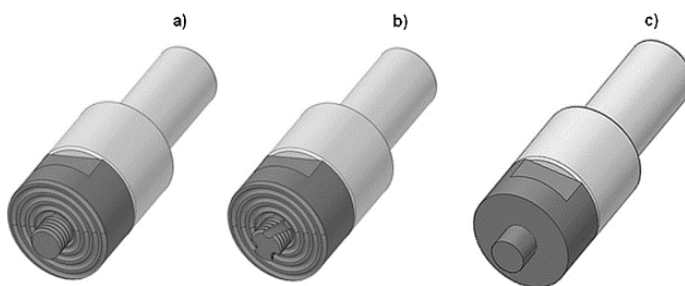


Figura 2.12. a) N1, b) N2, c) N3

Las conclusiones obtenidas en este trabajo fueron que todos los tipos de herramientas produjeron uniones de alta calidad, libres de defectos e imperfecciones; sin embargo, la geometría de la herramienta influye sobre las propiedades mecánicas de la unión. Los mejores resultados de tensión fueron producidos por las herramientas convencionales y Triflute, pero además la configuración de la junta influye sobre las propiedades mecánicas de la junta; y finalmente, las diferencias en la microestructura en los lados de avance y retirada pueden ser comprendidas mediante el modelo de flujo/temperatura desarrollado para las uniones FSW (3).

Entre los pocos estudios enfocados a los materiales compuestos se encuentra el desarrollado por L. Ceschini et al en 2006. En este trabajo la caracterización microestructural de la junta FSW mostró un refinamiento de grano substancial de la matriz de la aleación de aluminio (debido a la recristalización dinámica inducida por la deformación plástica y el calor friccional durante el proceso de soldadura) y una reducción importante del tamaño de las partículas. Las pruebas de tensión mostraron una alta eficiencia de las juntas FSW, sin embargo las pruebas de fatiga de bajo ciclo evidenciaron una reducción de vida de fatiga respecto al material base. Finalmente, se encontró que los mecanismos de fractura para los especímenes FSW fueron típicos de materiales MMC.

El material estudiado fue AA7005/10% vol.  $Al_2O_3$ . La herramienta FSW fue fabricada con Ferro-Titanit con un hombro de 18 mm de diámetro, un pin de 8 mm de diámetro, una longitud de 6.8 mm, y geometría helicoidal izquierda. La Figura 2.13 muestra la transición entre el material base y el lado de avance de la unión FSW.



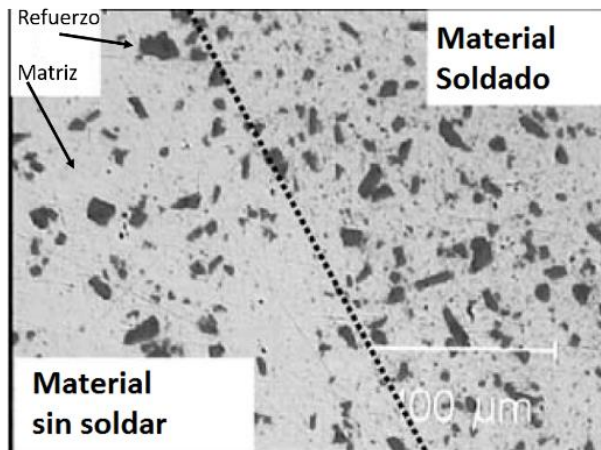


Figura 2.13. Transición entre material base y zona FSW

Como se muestra en la Figura 2.14 el proceso FSW produjo un refinamiento de grano en la matriz de aluminio. Mientras que en el material base el tamaño promedio de grano fue de  $30\ \mu\text{m}$ , en el botón de soldadura el grano decreció a un tamaño de  $12\ \mu\text{m}$  en el botón de la unión y no se apreciaron diferencias microestructurales entre los lados de avance y retirada de la unión.

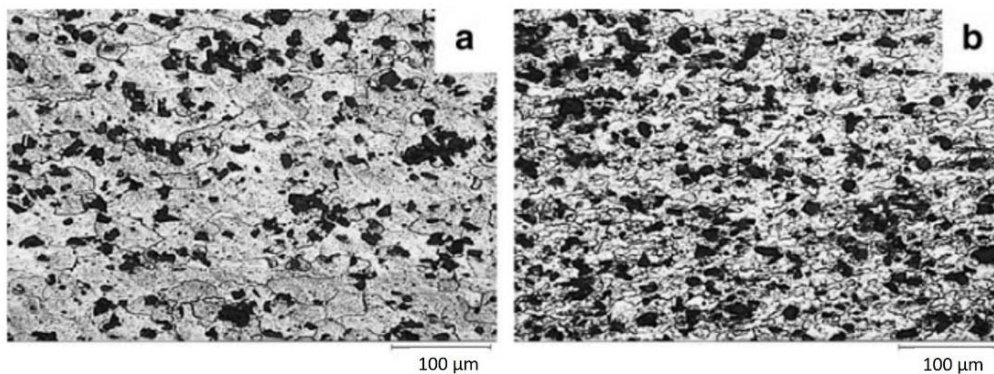


Figura 2.14. Efecto de FSW en el tamaño de grano. a) metal base y b) botón de soldadura

Los perfiles de microdureza se muestran en la siguiente Figura 2.15.

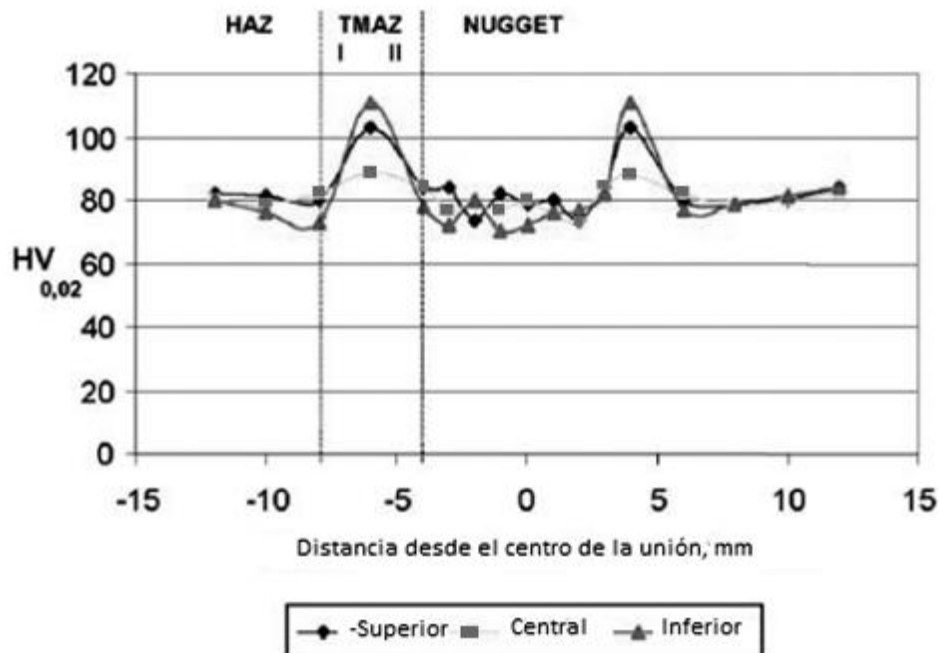


Figura 2.15. Perfiles de dureza HV en la zonas de la unión FSW

Las conclusiones alcanzadas por este grupo de investigadores fueron: el efecto abrasivo del pin en el refuerzo cerámico lleva a una significativa reducción del tamaño de las partículas de refuerzo; la dureza en el botón de soldadura es comparable a la dureza del material base, pero mayor en la zona TMAZ; la prueba de tensión mostró una eficiencia del 80% mientras que la vida de fatiga de bajo ciclo fue menor que la del material base; y por último, el análisis SEM de las superficies de fractura mostraron mecanismos típicos de fractura de los materiales MMC (18).

## **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA**

Para el desarrollo de este trabajo se ha revisado desde bibliografía básica y fundamental de ciencia en ingeniería de los materiales (6) hasta investigación actual correspondiente al proceso FSW y a los materiales compuestos de matriz de aluminio (2) -con un enfoque primario en la evolución de la microestructura que resulta de la unión FSW y su efecto en las propiedades mecánicas (19).

La principal razón para estudiar el efecto de la geometría de la herramienta FSW en la unión de materiales compuestos se encuentra en el Capítulo 11 de *Friction Stir Welding: from basics to applications* (11). En la parte introductoria de este capítulo Dos Santos et al (2010) muestran que existe una gran cantidad de investigación dirigida a las propiedades mecánicas y a la metalurgia de las aleaciones de aluminio en las distintas zonas de las uniones FSW; sin embargo, la metalurgia de FSW en otros materiales no ha sido investigada de manera consistente pues la mayoría del trabajo científico actual está relacionada en su mayor parte con aspectos no metalúrgicos del proceso. Por lo tanto, el estudio de los cambios en la microestructura de los materiales

compuestos unidos por el proceso FSW es necesario pues como hacen notar Matikas y Hassan (15), el comportamiento satisfactorio de los AMC depende de su integridad, y ésta depende en gran medida de la integridad de la interfaz matriz/refuerzo, la cual depende a su vez del procesamiento del material. En una de sus observaciones finales, los autores sostienen que de los resultados obtenidos en su trabajo se concluye que el papel de la segregación y precipitación sobre las propiedades mecánicas de los compósitos Al/Sic/p es crucial, afectando el comportamiento mecánico total de la pieza.

Mientras Matikas y Hassan se refieren en su trabajo al procesamiento de material, es decir, a deformación a la cual es sujeta el material cuando está siendo fabricado, K. J. Colligan (11) en 2010 ya apuntaba que en lo que se refiere al herramental FSW, en la actualidad no existe un diseño óptimo pues al igual que con los materiales de las herramientas no existe un material estándar aceptado dado que uno y otro son dictados por las características del material a unir y por las necesidades de desempeño del componente a fabricar.

En 2012 Mohanty (20) et al hicieron un estudio comparativo para investigar los efectos de tres distintas geometrías de la herramienta sobre las propiedades mecánicas y características microestructurales de la unión soldada de una aleación comercial de aluminio, y se observó que la geometría de la herramienta tiene un efecto significativo en el refuerzo de la soldadura, la microdureza y la resistencia de la soldadura.

Entre los estudios más relevantes y actuales en cuanto al proceso FSW y su utilización para la unión de materiales compuestos de matriz de aluminio se encuentran los trabajos realizados de manera independiente el uno del otro de T. Prater (2) en EU, y C. Devanathan y A. Suresh Babu (21) en la India. Ambas investigaciones se dirigen principalmente al desgaste de la herramienta.

De la revisión bibliográfica anterior se desprende que es necesaria mayor investigación científica y tecnológica de la microestructura de las uniones de materiales compuestos de matriz metálica producidas por el proceso FSW, y que esta investigación comprenda los aspectos de segregación, precipitación,

y cómo difieren éstos con el uso de diferentes geometrías de la herramienta FSW

## CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio considerado en este trabajo consistió en el análisis de la influencia de la geometría de las herramientas sobre la microestructura de materiales compuestos Al-SiC unidos mediante el proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW).

### 4.1 Metodología

Las actividades realizadas en este caso de estudio se llevaron a cabo de la siguiente manera (Figura 4.1): Recepción del material, caracterización del material base, microdureza del material base, diseño y fabricación de herramientas FSW, tratamiento térmico de herramientas, pruebas preliminares de las herramientas en AA6061, unión del material compuesto, caracterización de muestras unidas y microdureza, y por último, análisis de los resultados.

Para la realización del caso de estudio se requerían por lo menos dos herramientas FSW con diferentes geometrías, por lo tanto se hizo una modificación a un diseño original (Trivex, desarrollada por TWI); enseguida se fabricó una herramienta con las características de Trivex y otra con la modificación propuesta en el presente caso de estudio. Una vez fabricadas las herramientas se les realizó un tratamiento térmico para aumentar la dureza del

material y después se llevaron a cabo pruebas preliminares de soldadura FSW en una aleación de aluminio 6061.

Una vez realizadas las pruebas preliminares se procedió a unir el material compuesto Al-SiC con las herramientas fabricadas, éstas a su vez fueron preparadas metalográficamente para llevar a cabo la caracterización por microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. El último paso en este caso de estudio fue el registro de resultados para su análisis.

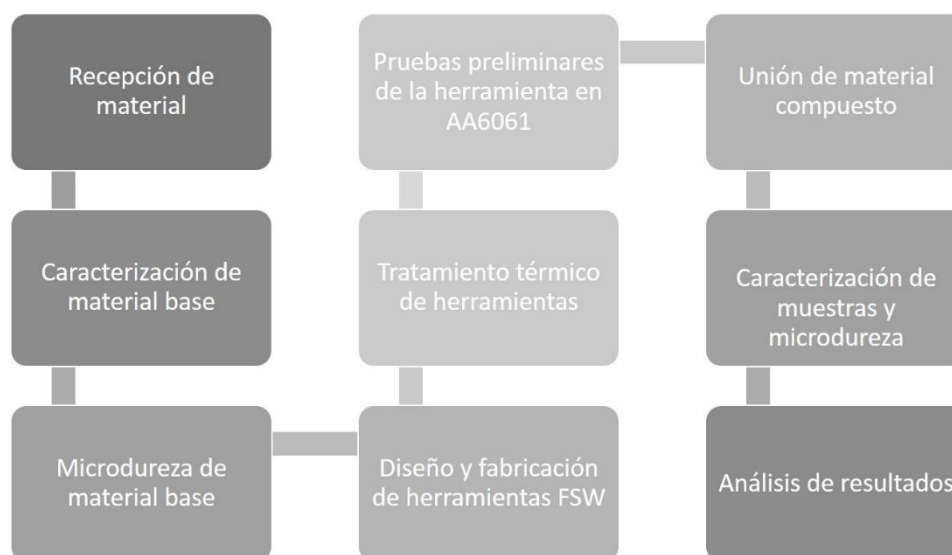


Figura 4.1 Diagrama esquemático de la metodología empleada en el caso de estudio

Para el desarrollo del presente caso de estudio se unió material compuesto de matriz de aluminio A359 reforzada con 20% de partículas de carburo de silicio (A359/SiC/20p) de 5mm de espesor, obtenido de MC21 Incorporated (EU) y cuya composición química se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Composición química de A359/SiC/20p (% e.p.)

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
% e.p.	8.5–9.5	0.2	0.2	0.1	0.50–0.70	0.1	0.2	89–91

Las propiedades mecánicas del material base se presentan en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2 Propiedades mecánicas de A359/SiC/20p

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	% Alargamiento	Módulo de Young (GPa)	Conductividad térmica (W/mK)	Microdureza Vickers
2.72	175	160	5	100	150	79.4 HV

Las muestras a unir se cortaron en placas de 80mm x 30mm x 5mm (Figura 4.2) y el proceso se llevó a cabo en el equipo CNC marca HAAS, modelo VM2, de la Celda de Manufactura Avanzada de COMIMSA (Figura 4.3, Figura 4.4).



Figura 4.2 Placas de material compuesto A359/SiC/20p





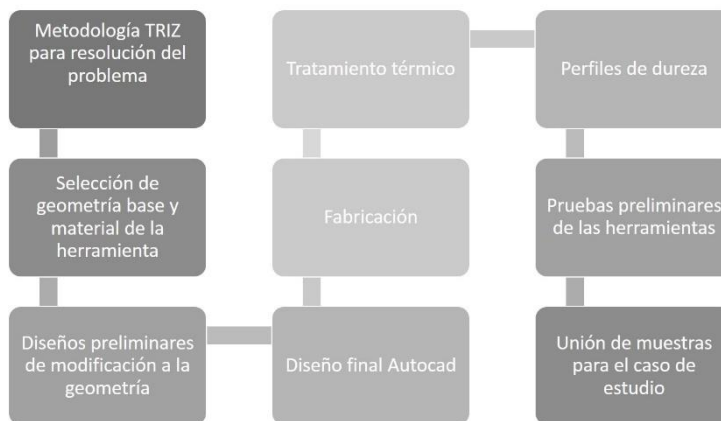
*Figura 4.3 Celda de Manufactura Avanzada de COMIMSA*



*Figura 4.4 Equipo CNC de la Celda de Manufactura Avanzada*

Las muestras fueron unidas usando dos herramientas de geometrías diferentes, diseñadas y fabricadas también en la Celda de Manufactura Avanzada de COMIMSA en el equipo CNC mencionado.

El proceso para la fabricación de las herramientas se muestra en la Figura 4.5. La idea básica fue la de añadir muescas al pin de una herramienta desarrollada por The Welding Institute (TWI) en el Reino Unido (22), con el propósito de incorporar material base en estas muescas y por lo tanto este funcionara como medio de autoprotección del mismo pin.



*Figura 4.5 Proceso para la fabricación de herramientas*

Las herramientas fueron fabricadas con acero grado herramienta D2 y después de fabricadas recibieron un tratamiento térmico para lograr un aumento en la dureza de 54 Rockwell C. El diseño de las herramientas está basado en el diseño original de la herramienta Trivex desarrollada por el TWI (Figura 4.6).



*Figura 4.6 Herramienta Trivex desarrollada en TWI*

Las características del herramental fabricado en COMIMSA se muestran en la Figura 4.7. Como se puede observar, la única diferencia entre ambas herramientas es la adición de muescas en el pin de una de ellas (H2). El propósito de las muescas fue el de actuar como depósito de material base plastificado, y que éste funcionara a su vez como protección del mismo pin; esto es, se trató de diseñar una herramienta con un bajo costo de producción y con características de autoprotección.

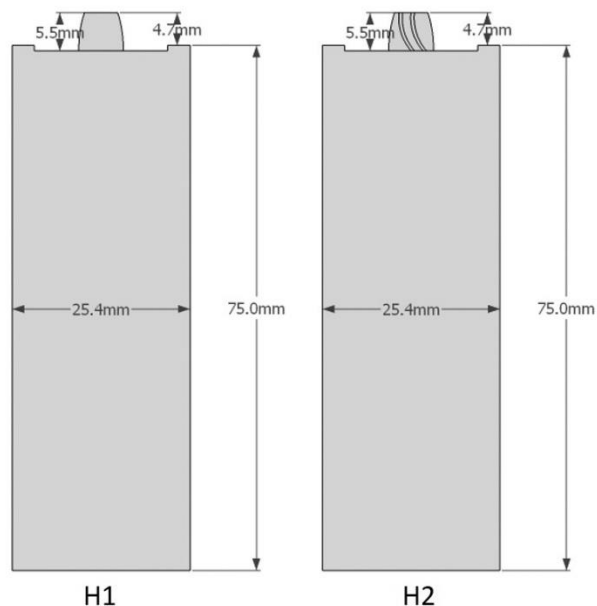


Figura 4.7 Representación esquemática de herramientas FSW. a) H1; b) H2

El tratamiento térmico aplicado a las herramientas se muestra en el diagrama de la Figura 4.8 y se llevó a cabo en COMIMSA. La etapa de austenización se realizó en un horno marca PREFINSA modelo HR-100 1000/1300 (Figura 4.9) con temple en aceite; para la etapa de revenido se utilizó una mufla FELISA modelo FE-340 (Figura 4.10).

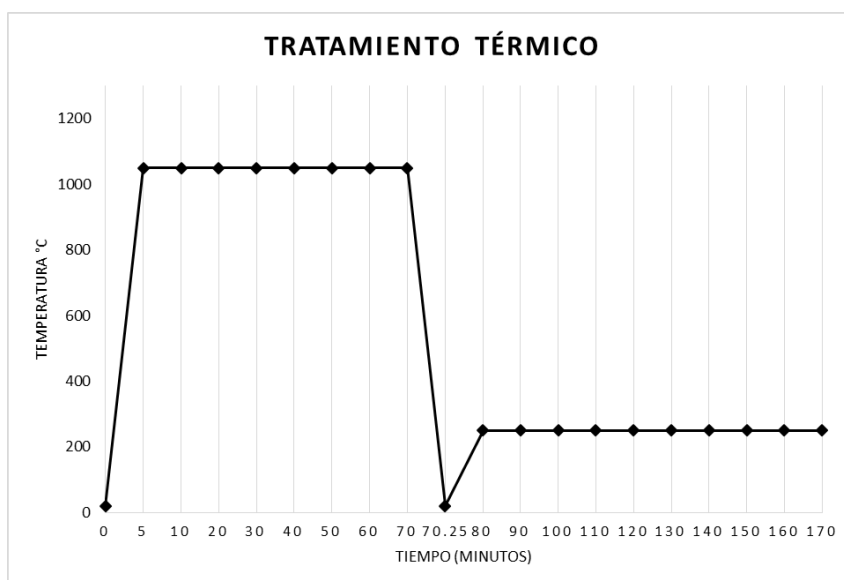


Figura 4.8 Tratamiento térmico para endurecimiento de herramientas



Figura 4.9 Horno PREFINSA modelo HR-100



Figura 4.10 Mufla FELISA modelo FE-340

Finalmente, las herramientas fabricadas se muestran en la Figura 4.11

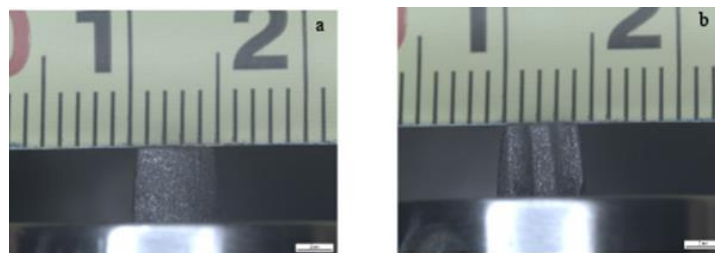


Figura 4.11 Geometrías del pin de las herramientas FSW. a) Herramienta sin muescas (H1). b) Herramienta con muescas (H2).

## 4.2 Parámetros

En total se realizaron nueve pruebas. La Figura 4.12 enseña las uniones de las muestras de material compuesto utilizando los dos tipos de geometrías de las herramientas fabricadas y los parámetros que se muestran en la Tabla 4.3:

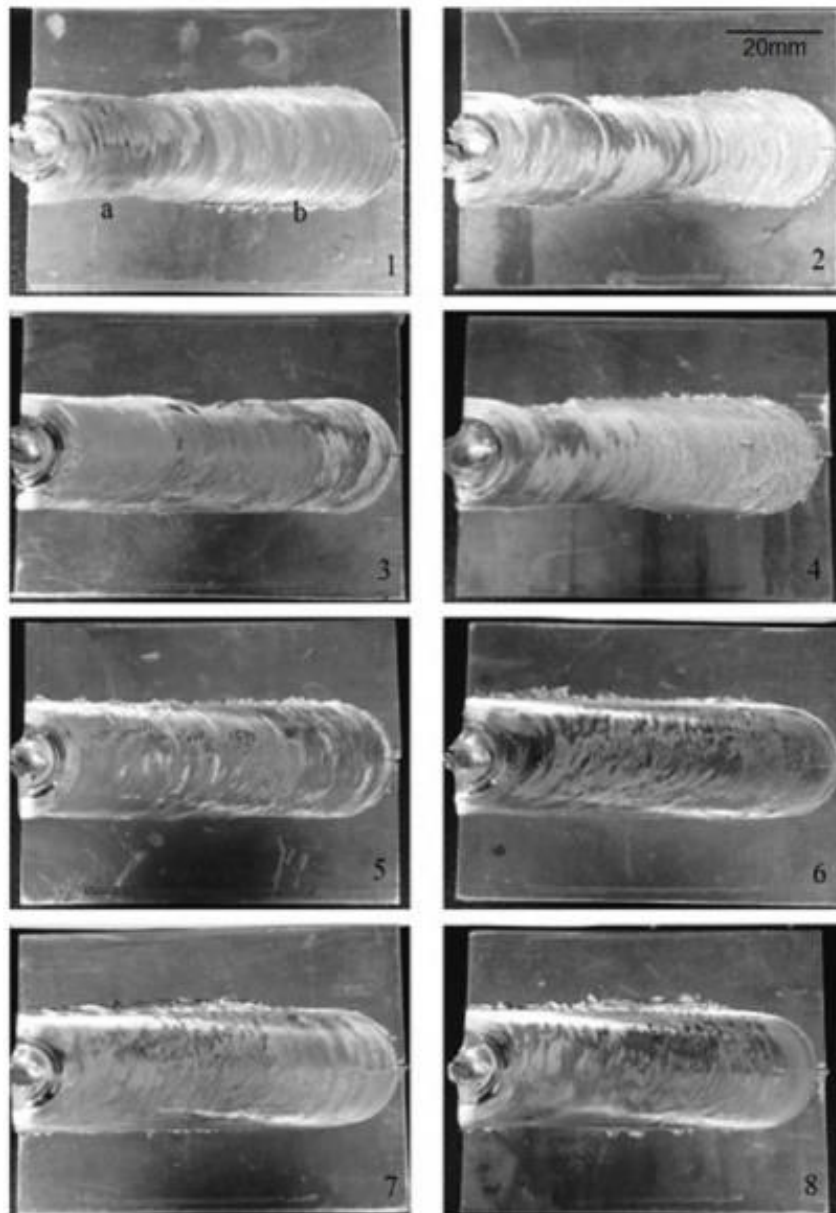


Figura 4.12 Material compuesto unido por FSW

Tabla 4.3 Herramienta y parámetros usados en el proceso FSW

Muestra #	Herramienta	Velocidad de avance (mm/m)	Velocidad de rotación (rpm)
1a	H1	75	1000
1b	H1	75	1250
2	H1	50	1000
3	H1	50	1400
4	H2	75	1000
5	H2	50	1400
6	H2	40	1600
7	H1	40	1600
8	H1	50	1500

Los parámetros de la Tabla 4.3 fueron seleccionados de acuerdo a la parametrización de Tracie Prater (23) para unir A6061/SiC/17.5p y también en base a las recomendaciones de O. Cuevas y A. Miranda (24).

Las muestras 1-4 presentan irregularidades en la superficie del material soldado, lo cual podría ser explicado por una falta de calor en el área correspondiente al hombro de la herramienta. Las muestras 5-8 presentan una buena apariencia superficial con un poco de vuelco (flashing) a lo largo de la unión; en todas las muestras se observa una grieta inicial debido a que es la parte donde la herramienta hace el primer contacto con el material y el pin se encuentra a una distancia de 3mm de la orilla del material.

### 4.3 Caracterización

En la Figura 4.13 se muestran los principales constituyentes del material base utilizado en el presente caso de estudio. Como se puede observar la micrografía muestra principalmente la matriz rica en aluminio, silicio eutéctico y carburos de silicio.



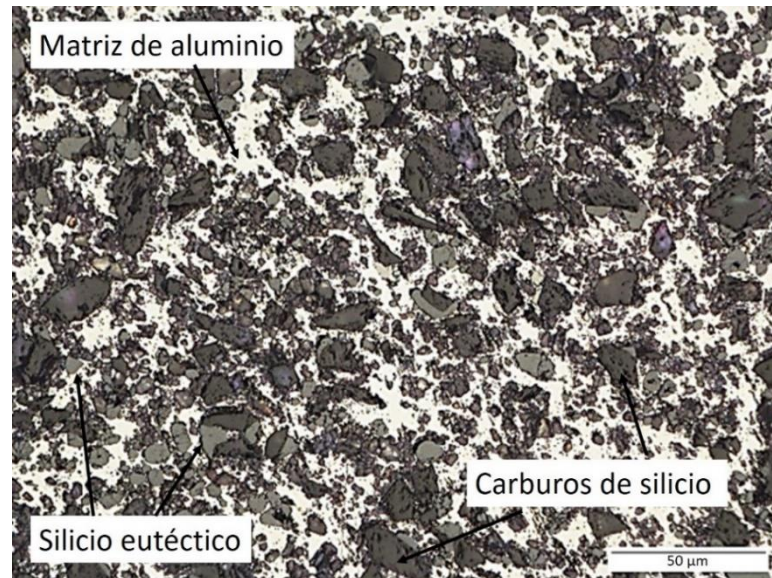


Figura 4.13 Microscopía óptica de los constituyentes del material compuesto A359/SiC/20p

La Figura 4.14 es una imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés) que muestra también los constituyentes del material:

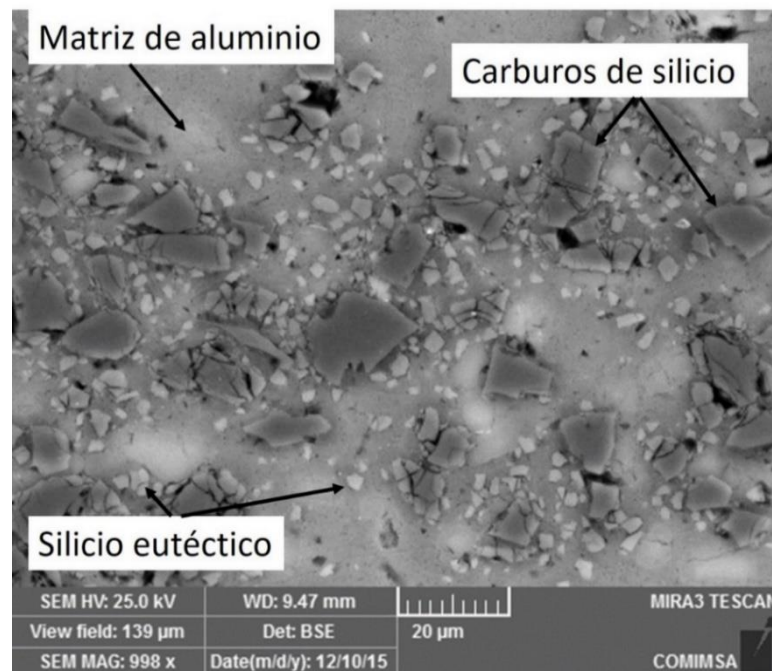


Figura 4.14 Imagen de microscopía electrónica de barrido. Constituyentes del material compuesto A359/SiC/20p

Las piezas unidas de 5mm de espesor fueron cortadas en secciones de 25mm x 10mm y montadas transversalmente en baquelita para su caracterización. Para el caso de estudio se seleccionaron pares de muestras correspondientes a las uniones realizadas por las herramientas H1 y H2 con parámetros idénticos para realizar una comparación entre las diferencias microestructurales en la región de la unión; las muestras que cumplieron tales requisitos se muestran en la Tabla 4.4:

Tabla 4.4 Muestras seleccionadas para caracterización

Muestra #	Herramienta	Velocidad de avance (mm/m)	Velocidad de rotación (rpm)
3	H1	50	1400
5	H2	50	1400
6	H2	40	1600
7	H1	40	1600

Las probetas de material compuesto recibieron una preparación metalográfica estándar; esto es, un desbaste inicial con lijas #240, #400, #600 y #800; pulido con pasta de diamante de 0.25 $\mu$ m y sílica coloidal de 0.04 $\mu$ m. Las muestras fueron enseguida atacadas con reactivo Weck por 20 segundos para revelar el tamaño, la segregación y la distribución de los constituyentes del material compuesto. La composición de la solución se muestra en la Tabla 4.5:

Tabla 4.5 Composición química del reactivo Weck

Composición	Símbolo	Volumen
Agua	H <sub>2</sub> O	100 mL
Permanganato de potasio	KMnO <sub>4</sub>	4gr
Hidróxido de sodio	NaOH	1 gr

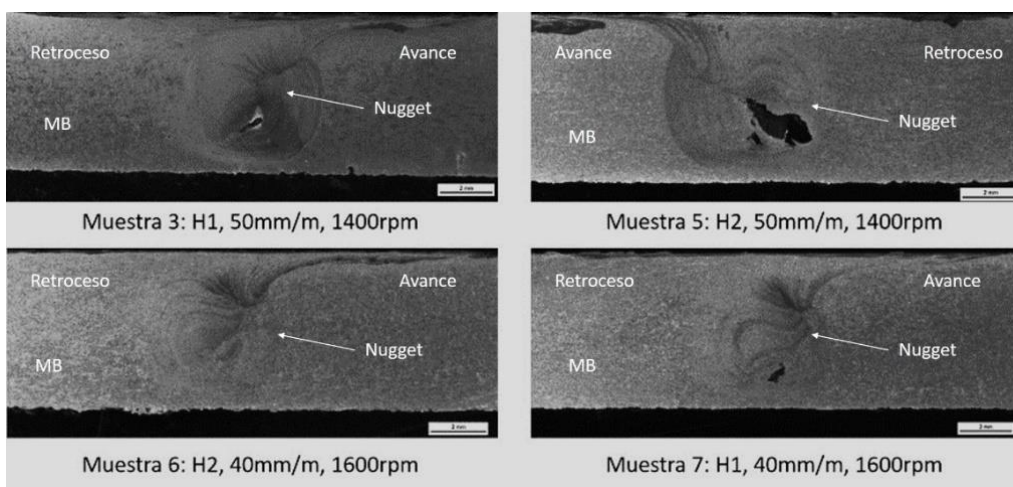
## 4.4 Resultados

### 4.2.1 Flujo de material durante el proceso de unión

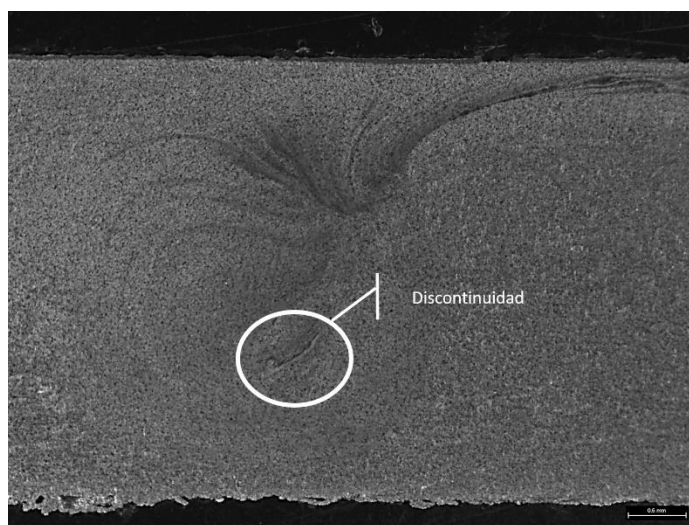
Las siguientes imágenes macroscópicas muestran el flujo típico de material plastificado producido por la herramienta en la región unida por el proceso FSW. A nivel macroscópico no se observan diferencias notables en el



flujo de material producido por las diferentes geometrías de las herramientas; sin embargo, como se puede observar, las muestras 3, 5, y 7 de la Figura 4.15 presentan un defecto de túnel (25) debido a un flujo deficiente de material e insuficiente consolidación en el botón de soldadura. Todas las muestras presentan penetración completa debido a la correcta longitud del pin con respecto al espesor del material. En la muestra 6 se puede observar una grieta, sin embargo cabe la posibilidad de que ésta sea el inicio de un defecto de túnel (Figura 4.16).



*Figura 4.15 Macrografía óptica de material compuesto unido por FSW*



*Figura 4.16 Discontinuidad presente en la muestra 6.*



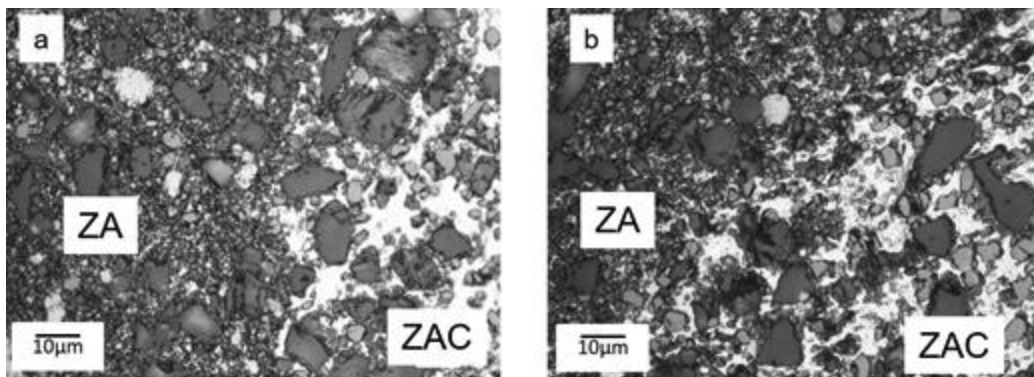


Figura 4.19 MO, escala 10µm. Interfaz entre nugget y ZAC; a) M6; b) M7

La Figura 4.20 muestra únicamente una parte del botón de soldadura de las mismas muestras; en ambas imágenes es posible ver que el proceso causa un refinamiento de las partículas de refuerzo y de silicio eutéctico en la zona de agitación. La fractura de partículas en este material es consistente con lo observado en aleaciones de aluminio de las series 6000 y 7000 reforzadas con 10% y 20% de  $Al_2O_3$  respectivamente (26).

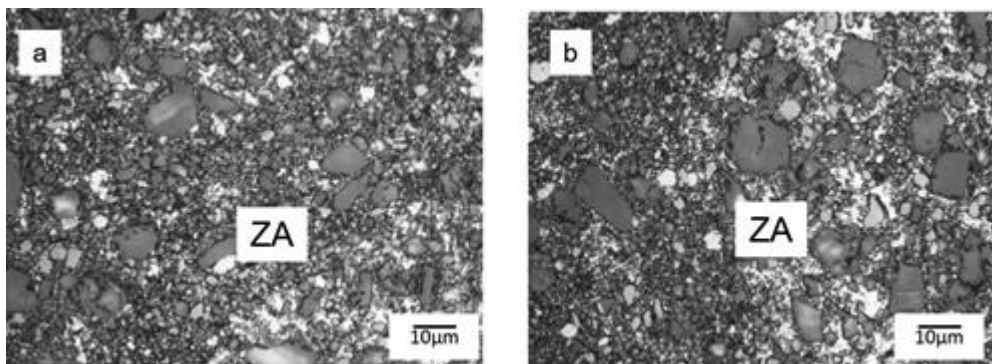
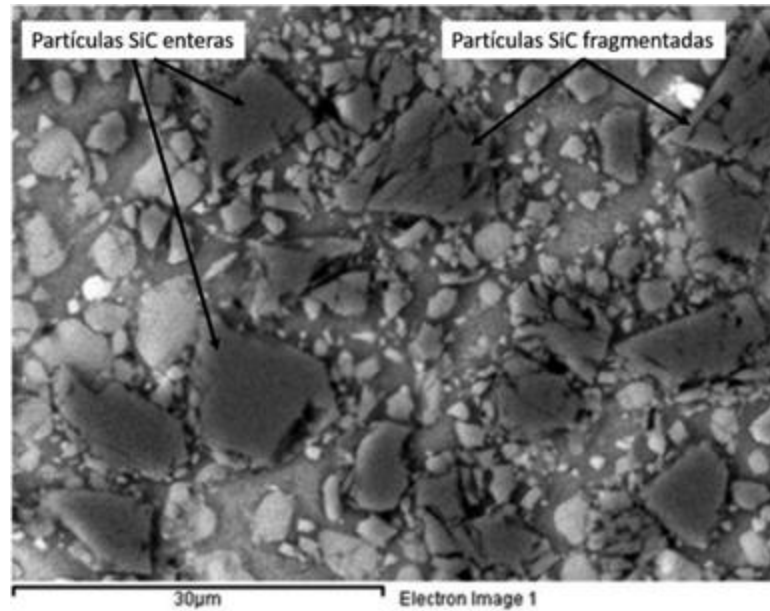


Figura 4.20 MO de botón de soldadura; a) M6; b) M7

Una de las características en el botón de soldadura producido por el proceso FSW, además del refinamiento de partículas, es la fragmentación de las mismas, como se puede ver en la Figura 4.21. Esta fragmentación de las partículas de refuerzo ha sido observada también en la unión de AA2124/SiC/25p (27).



*Figura 4.21 Imagen SEM del nugget de la muestra 6*

#### **4.2.2 Microdureza**

El perfil de microdureza en cada una de las muestras se realizó a 1 mm de distancia entre cada microindentación. En las imágenes de la Figura 4.22 se puede ver claramente que las microdurezas más altas se encuentran dentro de la zona de agitación, lo cual indica que existe un refinamiento de grano además de un refinamiento de partículas SiC y de silicio eutéctico (28).

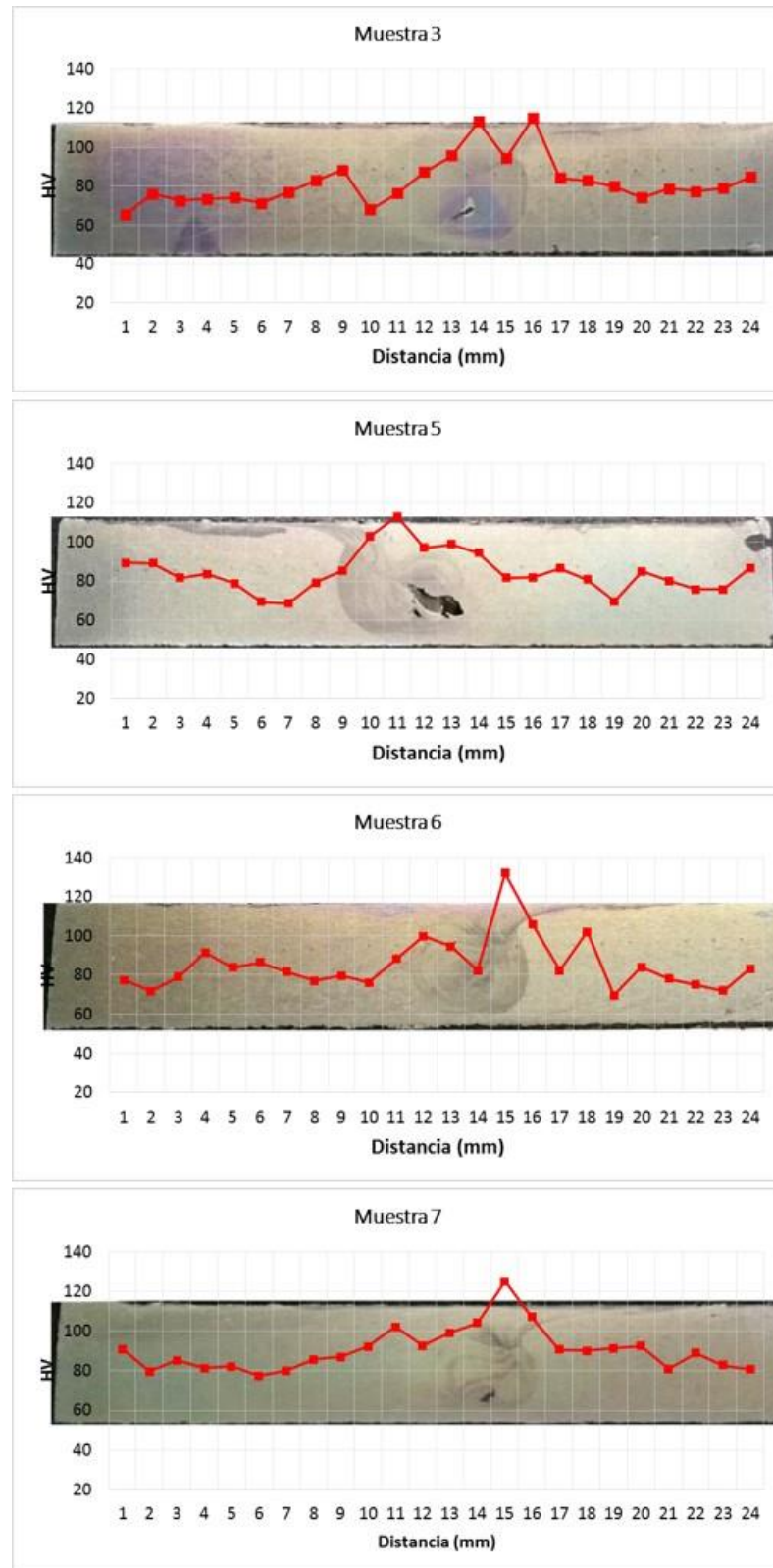


Figura 4.22 Microdureza Vickers de las muestras unidas por FSW. a) Muestra 6; b) Muestra 7



Las gráficas de la siguiente figura (Figura 4.23) permiten comparar directamente las microdurezas obtenidas con las diferentes herramientas y parámetros.

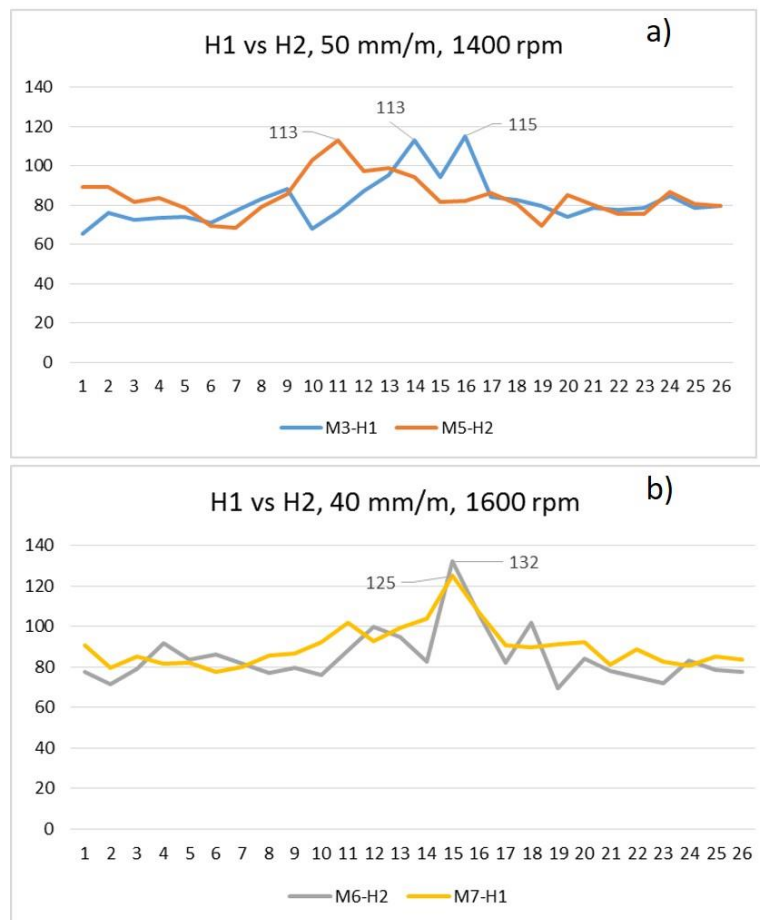


Figura 4.23 Comparación de durezas. a) Comparación Muestra 3 vs Muestra 5; b) comparación Muestra 6 vs Muestra 7

Como se puede ver en las gráficas, en este particular caso de estudio la selección de parámetros tiene una función más importante en cuanto a la dureza obtenida que la diferencia entre las geometrías de las herramientas. En el primer caso a), las durezas alcanzadas por las herramientas H1 y H2 fueron de 113 y 115 HV con parámetros de velocidad de avance de 50 mm/m y una rotación de 1400 rpm; en el segundo caso b) se utilizaron las mismas herramientas pero diferentes parámetros, esto es, una velocidad de avance de 40 mm/m y una rotación de 1600 rpm. Aunque no fue posible medir las temperaturas alcanzadas en las uniones durante el proceso, es bien sabido que una menor velocidad de

avance y una mayor rotación producen una mayor cantidad entrada de calor en el proceso; en este caso, una mayor entrada de calor no solamente produjo mayores valores de microdureza en la junta sino además una unión casi libre de defectos (véanse Figura 4.15 y Figura 4.16).

### 4.2.3 Desgaste de la herramienta

Uno de los mayores problemas que ocurre en la unión de materiales compuestos por el proceso FSW es el severo desgaste de la herramienta, lo cual se debe a la alta diferencia entre la dureza del material de la herramienta y el material de refuerzo del compuesto. En el presente caso de estudio la dureza alcanzada en las herramientas mediante el tratamiento térmico aplicado fue de 54 RC (equivalente aproximadamente a 580 HV); en contraste, las partículas SiC tienen una microdureza aproximada de 2600 HV (29). El resultado de tal discrepancia en las durezas se muestra en el desgaste sufrido por las herramientas H1 y H2 después de haber unido 400 y 240 mm respectivamente del material utilizado en este proyecto (Figura 4.24).

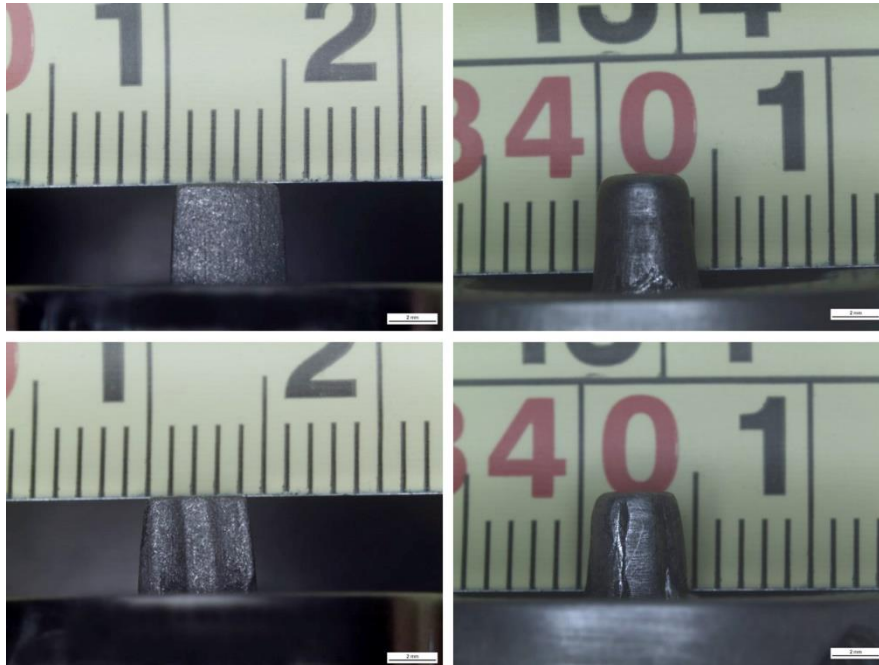


Figura 4.24 Desgaste de herramienta. a) H1 antes; b) H1 después; c) H2 antes; d) H2 después

Respecto a la unión de las muestras, además de las partículas de SiC y Si eutéctico fragmentadas en el botón de soldadura, es posible ver una distribución de partículas que no forman parte de los constituyentes típicos del material compuesto; éstas son partículas desprendidas del pin de la herramienta como resultado del desgaste de la misma (Figura 4.25).

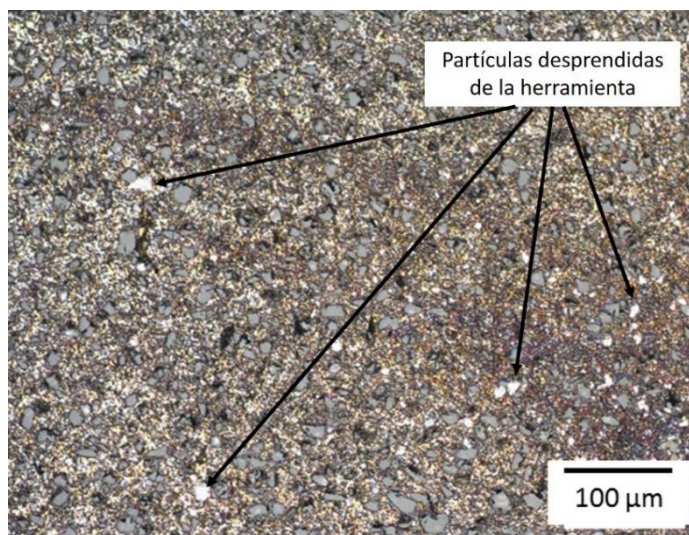


Figura 4.25 Botón de soldadura de la muestra 6

La Figura 4.26 corresponde a una imagen SEM donde se observa una partícula desprendida de la herramienta.

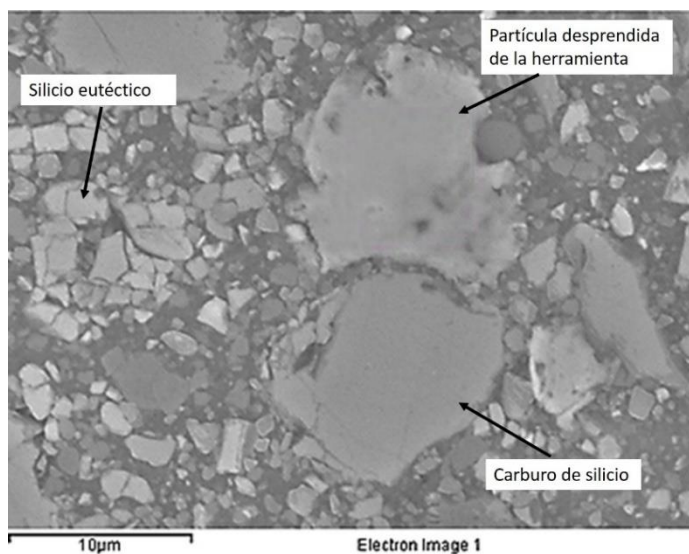


Figura 4.26 Imagen SEM que muestra una partícula desprendida del herramental



## Conclusiones

En esta investigación se analizó el estado del arte concerniente a la influencia de la geometría de la herramienta en la unión de materiales compuesto de matriz de aluminio reforzados con partículas de carburo de silicio. Para el caso de estudio se fabricaron dos herramientas iguales en las dimensiones y la forma del pin y del hombro. La primera herramienta se fabricó en base al diseño original de la herramienta Trivex del TWI; la segunda herramienta incluyó una modificación de la geometría del pin con el propósito de proporcionar una característica de autoprotección al mismo.

En las muestras analizadas se encontró que el efecto abrasivo del pin de ambas herramientas conduce al desgaste y fractura de las partículas de refuerzo del compuesto y a la fractura de las partículas de silicio presentes en la matriz de aluminio; además, ambas herramientas producen el flujo típico del proceso y una distribución homogénea de las partículas SiC y de silicio eutéctico.

Los análisis de microdureza muestran que la selección de parámetros influye en la dureza alcanzada; además, existe variación entre las durezas producidas por una herramienta y otra.

Las dos herramientas fabricadas sufrieron un desgaste significativo en el pin; la pérdida de volumen del pin es absorbida por el material que se une en el proceso.

Las recomendaciones para futuras investigaciones se enlistan a continuación

- ✓ Caracterización del material de la matriz sin refuerzo
- ✓ Rediseño de la geometría de la herramienta para minimización del desgaste
- ✓ Análisis del efecto del proceso FSW en la unión del material de la matriz (aleación A359 sin refuerzo)
- ✓ Búsqueda de alternativas para la fabricación de herramental
- ✓ Diseño de tratamiento térmico apropiado para alcanzar una dureza de 62 HRC o mayor
- ✓ Optimización de parámetros

## Bibliografía

1. **Chawla, Krishan K.** *Composite Materials*. Birmingham : Springer, 2013. ISBN 978-0-387-74364-6.
2. **Prater, Tracie.** *Friction Stir Welding of Metal Matrix Composites for use in aerospace structures*. s.l. : Elsevier, 2013. Vol. 93.
3. **Krasnowski K., Hamilton C., Dymek S.** *Influence of the tool shape and weld configuration on microstructure and mechanical properties of the Al 6082 alloy FSW joints*. Miami : Elsevier, 2014. Vols. ACME-193.
4. **Ashby, Michael F., et al.** *Engineering Materials and Processes Desk Reference*. Burlington : Butterworth-Heinemann, 2009. ISBN: 978-1-85-617586-9.
5. **Pedro M. G. P. Moreira, Lucas F. M. da Silva, Paulo M. S. T. de Castro.** *Structural Connections for Lightweight Metallic Structures*. Berlin : Springer-Verlag, 2012. ISBN 978-3-642-18186-3.
6. **Callister, William D. and Rethwisch, David G.** *Materials Science and Engineering An Introduction*. Danvers : John Wiley and Sons, 2010. ISBN 978-0-470-41997-7.
7. **R., Davis J.** *Metals Handbook Desk Edition*. s.l. : CRC Press, 1998. ISBN 0-87170-654-7.

8. **Foltz, John V. and Blackmon, Charles M.** *Metal Matrix Composites. ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.* s.l. : ASM International, 1990.

9. **Chawla, K. K. and Chawla, N.** *Metal Matrix Composites.* New York : Springer, 2006. ISBN 10 0-387-23306-7.

10. **Vilaca, Pedro and Thomas, Wayne.** *Friction Stir Welding Technology.* [book auth.] Pedro M. Moreira, Lucas F. da Silva and Paulo M. de Castro. *Structural Connections for Lightweight Metallic Structures.* Berlin : Springer-Verlag, 2012.

11. **Lowhasser, Daniela and Chen, Zhan.** *Friction stir welding. From basics to applications.* Boca Raton : Woodhead Publishing Limited, 2010. ISBN 978-1-84569-771-6 .

12. **Rai, R., et al.** *Review: friction stir welding tools.* s.l. : Maney, 2011. DOI 10.1179/1362171811Y.0000000023.

13. **Zhang, Y. L., et al.** *Review of tools for friction stir welding and processing.* Montreal : Maney, 2012. DOI 10.1179/1879139512Y.0000000015.

14. **Mishra, Rajiv Sharan, De, Partha Sarathi and Kumar, Nilesh.** *Friction Stir Welding and Processing.* s.l. : Springer, 2014. ISBN 978-3-319-07043-8.

15. **Matikas, Theodore E. and Hasan, Syed T.** *Deformation Characteristics of Aluminium Composites for Structural Applications.* s.l. : Intech, 2011. ISBN: 978-953-307-734-5.

16. **Hassan, S. T., Beynon, J. H. and Faulkner, R. G.** *Role of segregation and precipitates on interfacial strengthening mechanisms in SiC reinforced aluminium alloy when subjected to thermomechanical processing.* s.l. : Elsevier, 2004. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.183.

17. **Casalino, C., Campanelli, S. and Mortello, M.** *Influence of Shoulder Geometry and Coating of the Tool on the Friction Stir Welding of Aluminium Alloy Plates*. s.l. : Elsevier, 2014. doi: 10.1016/j.proeng.2014.03.153.

18. **Ceschini, L., et al.** *Effect of friction stir welding on microstructure, tensile and fatigue properties of the AA7005/10 vol.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p composite*. s.l. : Elsevier, 2007. doi:10.1016/j.compscitech.2006.07.029.

19. **Biro, Andrew L., Chenelle , Brendan F. and Lados, Diana A.** *Processing, Microstructure, and Residual Stress Effects on Strength and Fatigue Crack Growth Properties in Friction Stir Welding: A Review*. 2012. DOI: 10.1007/s11663-012-9716-5.

20. **Mohanty, H. K., et al.** *Effect of Tool Shoulder and Pin Probe Profiles on Friction Stirred Aluminum Welds – a Comparative Study* . s.l. : Springer-Verlag, 2012. DOI: 10.1007/s11804-012-1123-4 .

21. **Devanathan, C. and Suresh Babu, A.** *Friction Stir Welding of Metal Matrix Composite using Coated tool* . s.l. : Elsevier, 2014. doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.126 .

22. **Colegrove, P. A.** *MODELLING AND DEVELOPMENT OF THE TRIVEX FRICTION STIR WELDING TOOL*. s.l. : Welding in the world, 2004. IIW-1647-04.

23. **Prater, Tracie.** *Friction Stir Welding of Metal Matrix Composites. The joining of Al 6061/SiC/17.5 p using diamond coated tools*. Saarbrucken : VDM, 2009. ISBN: 978-3-639-10389-2.

24. **Cuevas, Octavio and Miranda, Argelia.** *Effect of FSW Parameters on Microstructure of Aluminum Matrix Composites Joints in Materials Characterization*. s.l. : Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-15203-5 .

25. **American Welding society (AWS).** *FSW Welding Handbook*. s.l. : American Welding Society, 2007.

26. **Cavaliere, P., et al.** *Friction Stir Welding of Ceramic Particle*. s.l. : Kluwer Academic Publishers, 2004.

27. **Uzun, Huseyin.** *Friction stir welding of SiC particulate reinforced AA2124 aluminium alloy matrix composite*. s.l. : Elsevier, 2014. doi:10.1016/j.matdes.2006.03.023.

28. **Fernandez, J. G. and Murr, L. E.** *Characterization of tool wear and weld optimization in the friction-stir welding of cast aluminum 359+20% SiC metal-matrix composite*. s.l. : Elsevier, 2004. doi:10.1016/j.matchar.2004.03.004.

29. **Groover, Mikell P.** *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. s.l. : Wiley, 2010. 978-0470467008.

## Listado de tablas

Tabla 2-1 Refuerzos típicos usados en MMC (9) .....	13
Tabla 2-2 Material de herramienta, geometrías y variables .....	18
Tabla 2-3 Variables del proceso .....	19
Tabla 4-1 Composición química de A359/SiC/20p (% e.p.) .....	36
Tabla 4-2 Propiedades mecánicas de A359/SiC/20p.....	37
Tabla 4-3 Herramienta y parámetros usados en el proceso FSW .....	42
Tabla 4-4 Muestras seleccionadas para caracterización .....	45
Tabla 4-5 Composición química del reactivo Weck .....	45

## Listado de figuras

Figura 2.1 Compuesto de matriz de Ti con fibras de SiC recubiertas con una aleación de B-Ti (4).....	5
Figura 2.2 Representación esquemática de varios tipos de arreglos de la fase dispersa en un matriz. (a) Cantidad; (b) tamaño; (c) geometría; (d) distribución; (e) orientación (6). .....	6
Figura 2.3 Representacion esquematica de diferentes tipos de MMC acorde al tipo de refuerzo (9).....	13
Figura 2.4 Esquema del proceso FSW (11) .....	16
Figura 2.5 Algunas herramientas típicas del proceso FSW .....	18
Figura 2.6 Macroestructura de una aleación AA356 unida por FSW usando la misma herramienta con diferentes velocidades de rotación y avance .....	21
Figura 2.7. Zonas de la unión FSW.....	21
Figura 2.8. Zonas de la unión FSW.....	22
Figura 2.9 a) Metal base y zona afectada por el calor, b) Zona termomecánicamente afectada y zona de agitación.....	23
Figura 2.10 Defecto en las uniones FSW.....	25
Figura 2.11 Geometrías usadas. a) Hombro cónico pequeño; b) hombro plano pequeño; c) herramienta de carburo con hombro grande; d) herramienta de carburo con hombro grande recubierto.....	27
Figura 2.12. a) N1, b) N2, c) N3.....	28
Figura 2.13. Transición entre material base y zona FSW .....	30



Figura 2.14. Efecto de FSW en el tamaño de grano. a) metal base y b) botón de soldadura .....	30
Figura 2.15. Perfiles de dureza HV <sub>0.02</sub> en la zonas de la unión FSW ...	31
Figura 4.1 Metodología empleada en el caso de estudio.....	36
Figura 4.2 Placas de material compuesto A359/SiC/20p .....	37
Figura 4.3 Celda de Manufactura Avanzada de COMIMSA.....	38
Figura 4.4 Equipo CNC de la Celda de Manufactura Avanzada .....	38
Figura 4.5 Proceso para la fabricación de herramientas.....	39
Figura 4.6 Herramienta Trivex desarrollada en TWI .....	39
Figura 4.7 Representación esquemática de herramientas FSW. a) H1; b) H2 .....	40
Figura 4.8 Tratamiento térmico para endurecimiento de herramientas	40
Figura 4.9 Horno PREFINSA modelo HR-100 .....	41
Figura 4.10 Mufia FELISA modelo FE-340 .....	41
Figura 4.11 Geometrías del pin de las herramientas FSW. a) Herramienta sin muescas (H1). b) Herramienta con muescas (H2). .....	41
Figura 4.12 Material compuesto unido por el proceso FSW .....	<b>¡Error!</b>
<b>Marcador no definido.</b>	
Figura 4.13 Microscopía óptica de los constituyentes del material compuesto A359/SiC/20p .....	44
Figura 4.14 Imagen de microscopía electrónica de barrido. Constituyentes del material compuesto A359/SiC/20p .....	44
Figura 4.15 Macrografía óptica de material compuesto unido por FSW .....	46
Figura 4.16 Discontinuidad presente en la muestra 6.....	46
Figura 4.17 Flujo de material plastificado durante el proceso FSW y zonas de la unión. ....	47
Figura 4.18 MO de las muestras atacadas con reactivo Weck. a) Muestra 6; b) muestra 7.....	47
Figura 4.19 MO, escala 10um. Interfaz entre nugget y ZAC; a) M6; b) M7 .....	48

Figura 4.20 MO de botón de soldadura; a) M6; b) M7 .....	48
Figura 4.21 Imagen SEM del nugget de la muestra 6 .....	49
Figura 4.22 Microdureza Vickers de las muestras unidas por FSW. a) Muestra 6; b) Muestra 7 .....	50
Figura 4.23 Comparación de durezas. a) Comparación Muestra 3 vs Muestra 5; b) comparación Muestra 6 vs Muestra 7 .....	51
Figura 4.24 Desgaste de herramental. a) H1 antes; b) H1 después; c) H2 antes; d) H2 después.....	52
Figura 4.25 Botón de soldadura de la muestra 6 .....	53
Figura 4.26 Imagen SEM que muestra una partícula desprendida del herramental.....	53