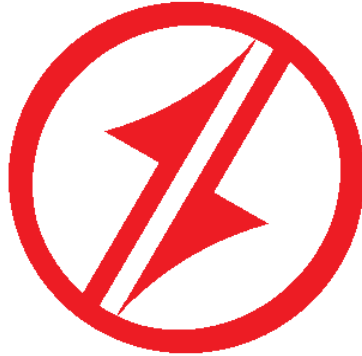


**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTADO DEL ARTE DE LA SOLDABILIDAD DE LOS COMPUESTOS DE  
MATRIZ DE ALUMINIO MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR  
FRICCIÓN FSW**

**POR**

**OSVALDO MARTÍNEZ MARTÍNEZ**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO, COAHUILA**

**SEPTIEMBRE 2011**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTADO DEL ARTE DE LA SOLDABILIDAD DE LOS COMPUESTOS DE  
MATRIZ DE ALUMINIO MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR  
FRICCIÓN FSW**

**POR**

**OSVALDO MARTÍNEZ MARTÍNEZ**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO, COAHUILA**

**SEPTIEMBRE 2011**

# **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a todas las personas que me brindaron su apoyo desinteresado en la realización de este trabajo. Especialmente a la Institución y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

# ÍNDICE

<b>SÍNTESIS</b>	1
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</b>	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Justificación	4
1.4 Planteamiento del Problema	4
1.5 Aportación Tecnológica	5
1.6 Alcance	5
<b>CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE</b>	6
2.1 Compuestos de Matriz Metálica	6
2.1.1 Descripción General de los Compuestos de Matriz Metálica (CMM)	6
2.1.2 Aplicaciones de los Compuestos de Matriz Metálica	9
2.1.3 Mecanismos de Refuerzo en los Compuestos de Matriz Metálica	10
2.1.4 Aleaciones Metálicas Utilizadas Para la Matriz Metálica	13
2.1.4.1 Aleaciones de Aluminio Utilizadas en la Fabricación de CMM	13
2.1.5 Producción y Procesamiento de CMM	16
2.1.6 Interface Matriz/Refuerzo	18
2.1.7 Propiedades y Comportamiento de los CMM	19
2.1.8 Mecanismos de Endurecimiento por Deformación Plástica en un Material Compuesto A6061/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /22p	20
2.2 Soldabilidad de los CMM	24

2.2.1 Procesos de Soldadura por Arco TIG y MIG Aplicados a CMM	26
2.3 Proceso de Soldadura por Fricción (FSW)	28
2.3.1 Componentes y Equipo	30
2.3.2. Variables que Afectan el Proceso	34
2.3.2.1 Presión de la Herramienta	34
2.3.2.2 Velocidad de Recorrido	37
2.3.2.3 Tiempo de Calentamiento	38
2.3.2.4 Flujo de Material y el Mecanismo de Unión	38
2.3.2.5 Relaciones Entre las Variables	41
2.4 Ventajas y Limitaciones de la Soldadura por Fricción	42
2.4.1 Ventajas de la Soldadura por Fricción	42
2.4.2 Limitaciones de la Soldadura por Fricción	43
2.5 Soldadura por Fricción Aplicada a los CMM	44
2.5.1 Defectos en Uniones de CMM Soldadas con FSW	45
2.5.2 Comparación de Tensiones Residuales en Soldadura Por Fusión GMAW Y FSW de Aluminio	46
2.5.3 Impacto de la Soldadura por Fricción en las Propiedades Mecánicas de los CMM	53
2.5.3.1 Impacto de la Soldadura por Fricción en las Propiedades Mecánicas de los CMM Reforzados con SiC	53
2.5.4 Evolución Microestructural en Al (CMM) Aplicando FSW	58
2.5.4.1 Evolución Microestructural en Al (CMM) Reforzados con SiC	58
2.5.4.2 Evolución Microestructural en Al (CMM) Reforzados con Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	61
2.5.4.3 Mediciones de Microdureza	65
<b>CAPÍTULO 3 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>68</b>
3.1 Proceso de Soldadura por Fricción (FSW) Aplicado a Compuestos de Matriz Metálica	68

<b>3.2 Soldabilidad y Aspectos Metalúrgicos del Proceso de Unión en Estado Sólido Mediante FSW de los CMM</b>	69
<b>3.3 Impacto de las Variables del Proceso FSW en las Características Microestructurales y Mecánicas de de los CMM</b>	70
<b>CONCLUSIONES</b>	71
<b>LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS</b>	73
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	76
<b>RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO</b>	79

# SÍNTESIS

Los compuestos de matriz de aluminio son una clase de materiales que poseen propiedades que los hacen atractivos para una gran variedad de aplicaciones debido a las propiedades que presentan. El uso de procesos de soldadura por arco en materiales compuestos de matriz metálica genera problemas en la soldabilidad estos, funden el material y lo degeneran, deteriorando o en su defecto destruyendo el efecto de los elementos de reforzantes, la generación de defectos como una gran diferencia de los puntos de fusión entre el agente de refuerzo y la matriz, grandes diferencias en los coeficientes de expansión térmica entre la matriz y el refuerzo, lo cual genera la formación de fuertes tensiones térmicas.

La diferente capacidad y conductividad calorífica de los componentes lleva a cambios en las condiciones de solidificación en la soldadura, Incluso en los casos en los que la temperatura seleccionada en el proceso de soldadura sea inferior al punto de fusión de la matriz, la duración del efecto calorífico puede ser elevada y en consecuencia se originarían reacciones químicas en la interface matriz-refuerzo provocando la pérdida de su resistencia por formación de fases frágiles propiciando problemas de viscosidad y segregación de partículas.

Por todo lo citado anteriormente los procesos de soldadura por fusión resultan poco adecuados para la unión de este tipo de materiales, el proceso de soldadura por fricción resulta tener ventajas comparativas respecto a los procesos de soldadura que involucran el uso del arco eléctrico como medio de

fusión, ya que la zona de coalecencia se ve ampliamente favorecida porque no se degenera el material y por lo tanto la microestructura, y las propiedades del material se ven ampliamente favorecidas, gracias a que los granos equiaxiales presentes en el cordón de soldadura, se ven afectados directamente por la recristalización dinámica la cual tiene lugar durante la soldadura por fricción debido a la deformación plástica, al final se obtiene una estructura de granos refinados, y una consecuente distribución homogénea de las partículas reforzantes del mismo modo las tensiones residuales generadas al aplicar un proceso por arco son significativamente mayores que las generadas por el proceso de soldadura por FSW, de ahí el notable desarrollo del proceso de soldadura por fricción-agitación, fricción lineal o FSW, aplicado a estos materiales logrando importantes y exitosas aplicaciones en la industria automotriz, aeronáutica, ferroviaria, naval, solo por citar algunas





# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La tecnología de fabricación de los compuestos de matriz metálica (CMM) es bastante conocida. Sin embargo, es escaso el número de publicaciones acerca de las tecnologías de unión aplicadas a estos materiales. Debido a las características tanto químicas, como mecánicas de dichos materiales, se requiere del estudio y desarrollo de nuevas tecnologías de unión aplicables a los mismos, tecnologías en cuyo proceso no se requiera el uso del arco eléctrico, ya que la acción de este, degenera el material, provocando la pérdida de características y propiedades para las cuales, dichos materiales han sido diseñados.

Uno de los procesos de unión que mas aplicación ha tenido en la industria de estos materiales, gracias a las características del proceso, sin duda es el proceso de soldadura por fricción agitación, el cual debido al alto costo de las investigaciones científicas y al carácter militar de muchas de ellas, se evita la difusión de los resultados obtenidos al aplicar los procesos de soldadura en los compuestos de matriz metálica (CMM).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Estudiar el estado del arte del proceso de unión en estado sólido mediante soldadura por fricción (FSW) aplicado a los compuestos de matriz de aluminio.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Obtener información fundamental del proceso de soldadura por fricción FSW utilizado como método de unión en estado sólido.
- Recopilar información de los compuestos de matriz de aluminio.
- Determinar la soldabilidad y conocer los aspectos metalúrgicos del proceso de unión en estado sólido mediante soldadura por fricción de los compuestos de matriz de aluminio.
- Estudiar el impacto de las variables del proceso de unión mediante soldadura por fricción FSW en las características microestructurales y mecánicas de las zonas de unión de los compuestos de matriz de aluminio.

### **1.3 Justificación**

Los compuestos de matriz de aluminio son una clase de materiales que poseen propiedades que los hacen atractivos para una gran variedad de aplicaciones donde se requiere de resistencia al desgaste, resistencia mecánica, estabilidad química, así como de estabilidad dimensional a temperaturas relativamente elevadas. Debido a las propiedades anteriormente mencionadas, estos materiales han encontrado una aplicación directa en la industria automotriz, aeroespacial, militar, electrónica, e incluso en la fabricación de componentes y equipo de carácter deportivo.

### **1.4 Planteamiento del Problema**

Debido a las características mecánicas y químicas de los compuestos de matriz metálica, los procesos de unión aplicados a estos deben ser seleccionados cuidadosamente, tomando en cuenta que los procesos de soldadura que funden el material mediante el uso de arco eléctrico lo degeneran, destruyendo el efecto de los elementos de refuerzos. Por tanto, los procesos de soldadura por fusión no suelen resultar adecuados para la unión de este tipo de materiales debido a que al presentarse altas temperaturas ocurren reacciones entre las partículas de refuerzo y el aluminio líquido, lo que resulta perjudicial para las propiedades mecánicas de las uniones de los Al(CMM).

## **1.5 Aportación Tecnológica**

El estudio de esta monografía estará enfocado al análisis del estado del arte de la soldabilidad de los Al (CMM) mediante soldadura por fricción (FSW) puesto que el proceso de soldadura por fricción es adecuado para estos materiales es preciso trabajar en el estudio y control de las variables del mismo sobre las propiedades del material después de ser soldado.

## **1.6 Alcance**

La presente monografía pretende realizar una recopilación de información científica y tecnológica que permita desarrollar capacidades asociadas con la línea de soldadura por fricción FSW.

# CAPÍTULO 2

## ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Compuestos de Matriz de Metálica

#### 2.1.1 Descripción General de los Compuestos de Matriz Metálica (CMM)

Gracias a las características y propiedades de estos materiales se han encontrado un gran número de aplicaciones en la industria. Dichas propiedades se ven favorecidas gracias a la combinación de las características de la matriz y del refuerzo, dando como resultado un material con características especiales en comparación con los materiales sin refuerzo [1].

Los CMM se definen como un sistema de materiales formados por una mezcla o combinación de dos o más constituyentes que difieren en su forma y composición química [2]. La idea original de utilizar los CMM, es el de combinar una segunda fase en materiales convencionales de ingeniería para producir una combinación de características que no se logran obtener a partir de los constituyentes individuales [3].

Los CMM de matriz metálica reforzados con partículas cerámicas son materiales de gran interés para muchas aplicaciones, gracias a sus elevadas propiedades mecánicas debidas a su relación resistencia-peso, en comparación con las aleaciones no reforzadas, de igual manera son tomados en cuenta por su capacidad de mantener su comportamiento en ambientes agresivos y a temperaturas relativamente altas. La combinación de un refuerzo cerámico, capaz de soportar cargas elevadas, con una matriz ligera, proporciona estas propiedades [5]. Otras ventajas de los CMM es que no son flamables, no dejan escapar gases en el vacío, y sufren un mínimo ataque químico por los fluidos orgánicos tales como combustibles y solventes [3,4].

Un criterio importante para la aplicación y uso de estos materiales es la resistencia a la fatiga, particularmente en los componentes automotrices [6]. La primera aplicación comercial de los CMM fueron pistones para motores diesel por Toyota (1982) para después usarlos en partes de transmisión. También Honda ha aplicado estos materiales en los cilindros de bloques de motores de aluminio [7].

La mayor parte del trabajo comercial sobre los CMM se ha enfocado en aleaciones de aluminio como la matriz metálica. La combinación de peso ligero, resistencia al medio ambiente y propiedades mecánicas han hecho que las aleaciones de aluminio sean muy populares. Estas propiedades también hacen que el aluminio sea una buena elección para ser utilizado como una matriz metálica; el punto de fusión del aluminio (660°C) es lo suficientemente alto para satisfacer muchos requisitos de aplicaciones térmicas así como también es lo suficientemente bajo para proporcionar un procesamiento óptimo de los CMM [3].

Cabe mencionar que la mayor parte de los CMM se desarrollaron originalmente para la industria aeroespacial. Sin embargo, en la actualidad algunos de estos materiales han encontrado aplicación en la industria

ferroviaria, en la industria automotriz para la fabricación de componentes, en la industria militar es utilizado como blindaje balístico, en aplicaciones deportivas se utilizan para la fabricación de artículos como cañas de pesca, raquetas, palos de golf, etc., e inclusive componentes para vehículos de carreras [8].

Estos compuestos presentan ventajas importantes con respecto a los metales no reforzados y compuestos tales como los de matriz polimérica (PCM).

Con respecto a los metales no reforzados ofrecen las siguientes ventajas:

- Mayor ahorro de peso debido a una mayor relación resistencia-peso.
- Excelente estabilidad dimensional.
- Elevada estabilidad térmica, es decir, resistencia a la fluencia.
- Mejores características de fatiga cíclica.

Con respecto a los compuestos de matriz polimérica ofrecen:

- Mayor resistencia y rigidez.
- Temperaturas de servicio más altas.
- Una mejor conductividad eléctrica.
- Mayor conductividad térmica.
- Buenas propiedades anti radiación (láser, ultravioleta, nuclear, etc.) [9].

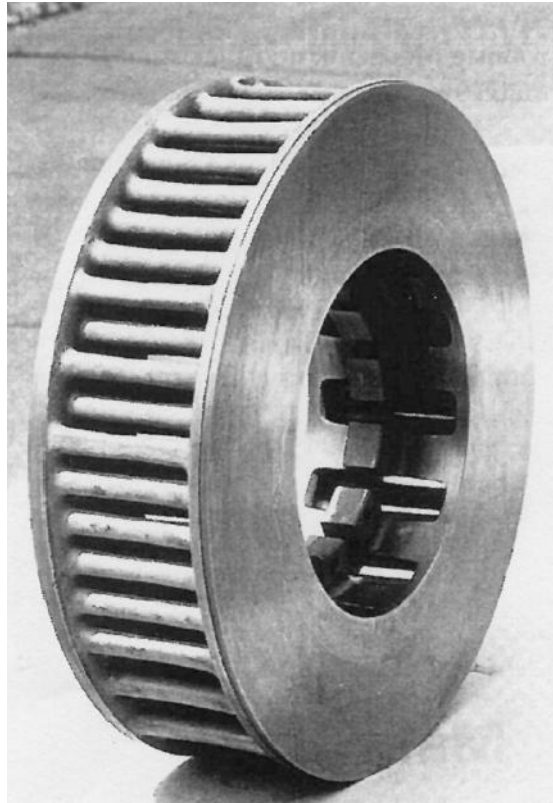


### 2.1.2. Aplicaciones de los Compuestos de Matriz Metálica

En la industria automotriz y aeronáutica tienen un gran potencial de aplicación por dar solo un ejemplo del éxito de uso de materiales compuestos de matriz de aluminio son los pistones reforzados con fibras cortas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  fabricados mediante sinterizado tal como se muestra en la Figura 2.1 se pueden alcanzar características comparables los pistones de hierro. La razón de la aplicación de materiales compuestos es, como ya se ha descrito, gracias a las propiedades que presentan a altas temperaturas. En el ramo de la aeronáutica los trenes de aterrizaje, por ejemplo son una de las muchas aplicaciones, así como ejes o flechas de control, discos de freno ventilados, (ver Figura 2.2) [10].



**Fig. 2.1.** Pistón para motor diesel hecho de aluminio reforzado con fibras cortas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [10].



**Fig. 2.2.** Disco para freno hecho de aluminio y partículas reforzantes [10].

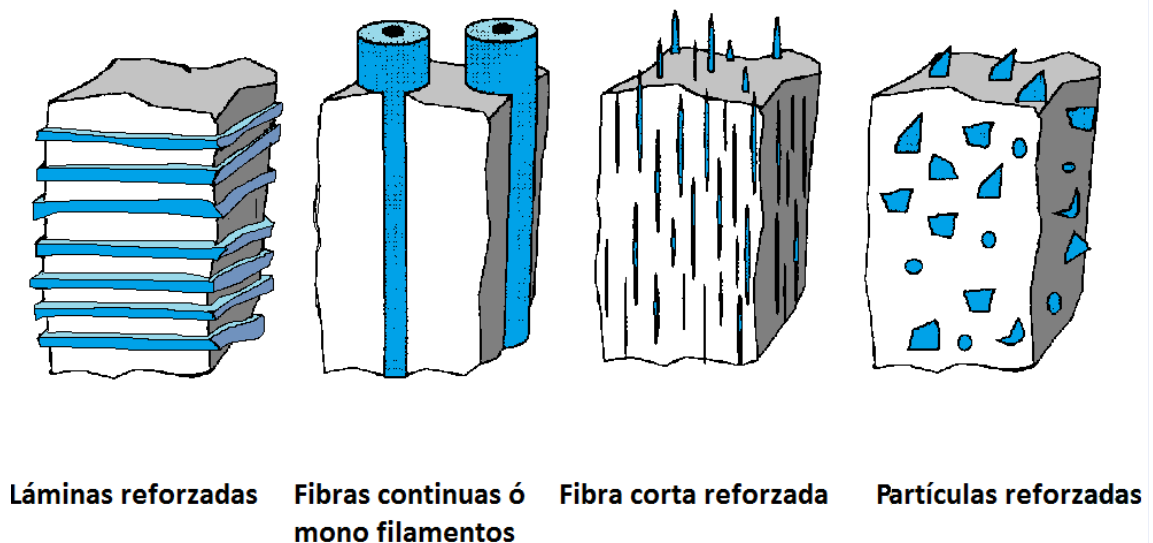
### **2.1.3 Mecanismos de Refuerzo en los Compuestos de Matriz Metálica**

Por lo general, existen 3 tipos de compuestos de matriz metálica (CMM):

- De partículas reforzadas.
- De fibra corta reforzada.
- De fibra continua o lamina reforzada.

Los refuerzos utilizados en los CMM pueden ser metálicos o de cerámica. En algunos casos especiales el compuesto puede consistir en una aleación metálica reforzada con una fibra, este caso podría ser comparado con en el caso de las láminas de fibra de vidrio reforzado con epoxi o epoxi reforzada fibra de aramida. Los tipos de refuerzo se pueden clasificar en tres categorías: fibras continuas o mono filamentos, en algunos casos láminas reforzadas, whiskers (fibrillas) y partículas.

Desde el punto de vista de propiedades mecánicas, se puede obtener una gran mejora mediante el uso de fibras continuas, reforzando en la dirección del esfuerzo aplicado; mientras que con whiskers y partículas se experimenta una disminución de resistencia pero se obtiene una gran isotropía en el material. La forma en que los refuerzos pueden estar presentes dentro de la matriz metálica se muestra esquemáticamente en la Figura 2.3 [10].



**Fig. 2.3.** Esquema de tipos de reforzamiento de los compuestos de matriz metálica (CMM) [10].

El tipo de refuerzos para materiales compuestos de matriz metálica que se utilizan se determinan por la aplicación que tendrá el material compuesto. Tales aplicaciones exigen demandas de aplicación general, tales como:

- Baja densidad.
- Compatibilidad mecánica (un coeficiente de expansión térmica que es bajo, pero adaptados a la matriz).
- Compatibilidad química.
- Estabilidad térmica.
- Alto módulo de Young.
- Alta compresión y resistencia a la tracción.
- Buena capacidad de transformación.
- Eficiencia económica.

Estas demandas sólo se pueden lograr mediante el uso de elementos no metálicos inorgánicos como los que se muestran en la Tabla 2.1 [9].

**Tabla 2.1.** Ejemplos de algunos elementos de reforzamiento utilizados en materiales compuestos de matriz metálica (CMM) [10].

Tipo	Diámetro (Micras)	Ejemplo
Partículas	1-25	SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , BN, B <sub>4</sub> C, WC
Fibras cortas	1-5	C, SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub>
Fibras continuas	3-150	SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , C, B, W, Nb-Ti, Nb <sub>3</sub> Sn

## **2.1.4 Aleaciones Metálicas Utilizadas Para la Matriz Metálica**

La selección adecuada de las aleaciones de la matriz metálica está determinada principalmente por el uso y aplicación del material propuesto. Gracias a su facilidad para ser procesados, las aleaciones de metales ligeros son de gran demanda para la fabricación de matrices para CMM.

En cuanto al uso de materiales, debido a su baja densidad y una excelente fuerza, dureza y resistencia a la corrosión algunos de los más importantes en este caso han sido el aluminio y sus aleaciones, así como aleaciones de titanio, ambos utilizados frecuentemente en la industria aeroespacial y automotriz.

Algunas aleaciones especiales se utilizan también para la producción de los CMM debido a que cuentan con una rápida solidificación, esencial para la producción de polvo, cuando el caso de producción lo requiera, como por ejemplo en el área de la metalurgia de polvos [9].

### **2.1.4.1 Aleaciones de Aluminio Utilizadas en la Fabricación de CMM**

Los CMM's pueden fabricarse con aleaciones comerciales de aluminio forjado, tales como 6061, 2124 y 7075, y aleaciones de aluminio, como aluminio-silicio y aluminio-magnesio, aleaciones ligeras de aluminio y litio, como el 8090.

Las aleaciones de aluminio comerciales se pueden clasificar en las siguientes categorías: Forjado aleaciones tratables térmicamente, tales como Al-Magnesio-Silicio (6000), Al-Cu-Mg (2000), y Al-Zn-Mg (7000), los cuales requieren de un tratamiento térmico para una alta resistencia a través de endurecimiento por precipitación.

Estas aleaciones ofrecen resistencia y ductilidad gracias a ello se han utilizado ampliamente en la industria aeroespacial y otras aplicaciones estructurales.

La aleación 6061 es una de las aleaciones más comunes en la serie 6000, que tiene composiciones equilibradas de magnesio y silicio. Esto también contiene 0,2% de Cr, que proporciona una mejor resistencia a la corrosión. Mientras que la presencia de silicio mejora la respuesta de endurecimiento por envejecimiento, pero por otro lado puede reducir la ductilidad fragilizar el metal, debido a la segregación de silicio superior a los límites de grano. Esta aleación contiene también titanio para controlar la recristalización, ya que la mayoría de las aleaciones de aluminio por lo general contienen cromo, manganeso, circonio o titanio con el propósito de refinar el grano [11].

La Tabla 2.2 ilustra las composiciones y propiedades mecánicas de algunas aleaciones. Las aleaciones Aluminio-Magnesio-Silicio son ampliamente utilizadas en aplicaciones de media resistencia debido a que poseen buena ductilidad, buena soldabilidad, resistencia a la corrosión. El magnesio y el silicio son añadidos en la serie 6000 en cantidades equilibradas [11].

**Tabla 2.2.** Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio utilizadas como matriz metálica en compuestos de matriz metálica (CMM) [11].

Aleación	Composición	Límite Elástico en 0.2%		Resistencia a la Tracción		Elongación %	Tenacidad	
		Mpa	Ksi	Mpa	Ksi		Mpa	Ksi
6061	Al-1Mg-0.6Si-0.25Cu-0.19Cr-0.1Ti-0.7Fe	275	39.9	310	45.0	12	27	25
6063	Al-0.7Mg-0.4Si-0.1Cu-0.1Cr-0.1Ti-0.35Fe	215	31.2	240	34.8	12	...	...
2014	Al-4.5Cu-0.5Mg-0.26Mn-0.7Fe-0.8Si	410	59.5	480	69.6	13	31	28
2024	Al-4.3Cu-1.5Mg-0.6Mn-0.5Fe-0.5Si	450	65.3	480	69.6	6	26	24
2124	Al-3.9Cu-1.5Mg-0.6Mn-0.3Fe-0.2Si	440	63.8	490	71.1	8	32	29
2618	Al-2.3Cu-1.6Mg-1Ni-1.1Fe-0.15Fe-0.15Si	330	47.9	435	63.1	10	...	...
2219	Al-6.3Cu-0.02Mg-0.3Mn-0.3Fe-0.2Si-0.1Zr	315	45.7	475	68.9	10	36	33
7075	Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-0.23Cr-0.2Ti	430	62.4	500	72.5	13	32	29
7050	Al-6Zn-2.3Mg-2.3Cu-0.11Zr-0.15Fe-0.12Si	510	74.0	550	79.8	11	33	30
7090 <sup>(a)</sup>	Al-8Zn-2.5Mg-0.95Cu-1.45Co-0.15Fe-0.12Si	580	84.1	620	89.9	9	26	24
7091 <sup>(a)</sup>	Al-6.5Zn-2.5Mg-1.45Cu-0.4Co-0.15Fe-0.12Si	545	79.0	590	85.6	11	46	42
CW67 <sup>(a)</sup>	Al-9Zn-2.5Mg-1.5Cu-0.14Zr-0.1Ni	580	84.1	614	89.1	12	43	39

### **2.1.5 Producción y Procesamiento de Materiales Compuestos de Matriz Metálica**

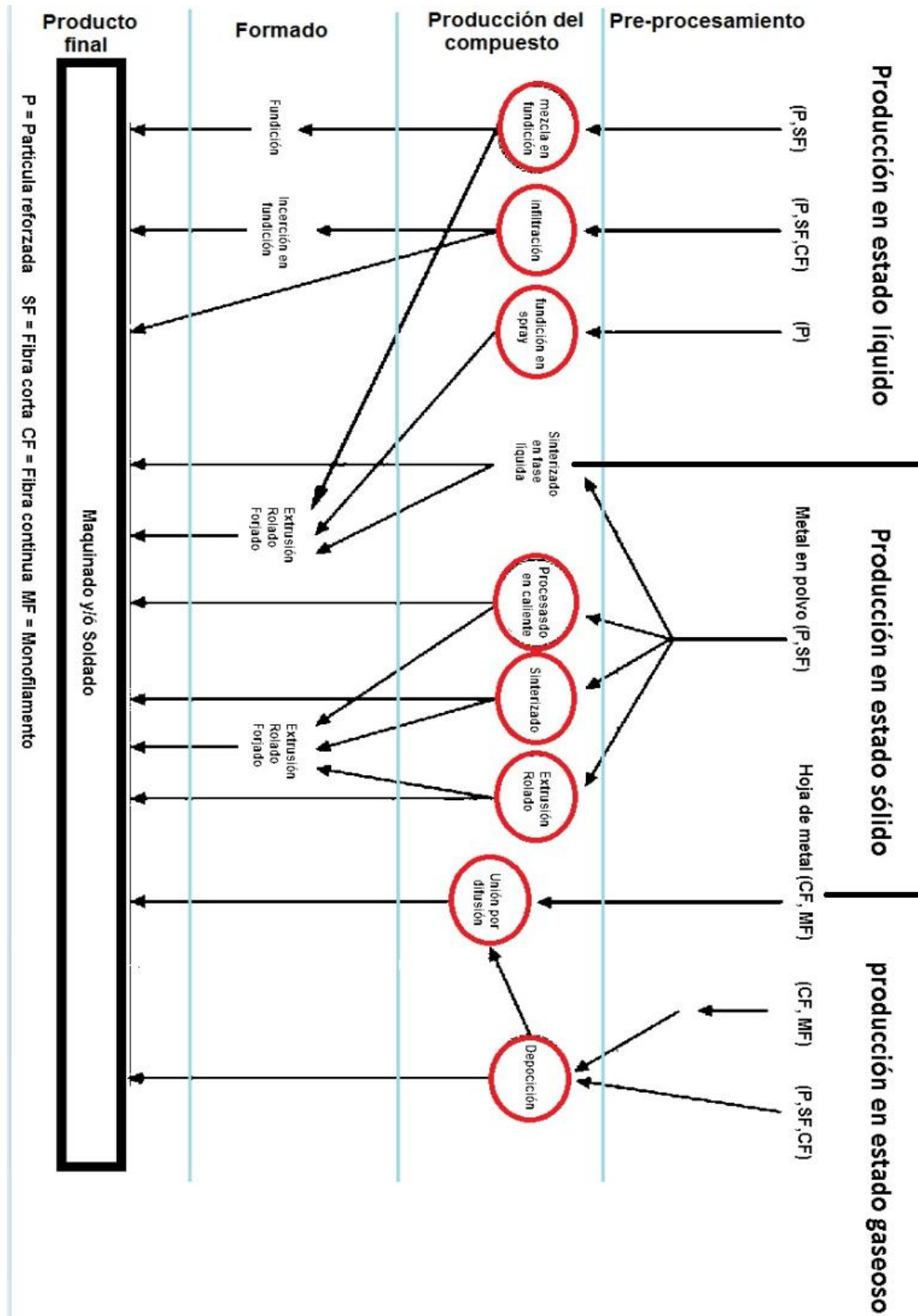
Existen diferentes y variados procesos de producción de los CMM. La selección de la ingeniería de proceso adecuado se determina en base a las características deseadas, cantidad y distribución de los componentes de refuerzo (partículas y fibras), la aleación de la matriz y la aplicación.

Al modificar el método de fabricación, procesamiento y acabado, así como por la forma de los componentes de refuerzo es posible obtener diferentes perfiles característicos, aunque la misma composición y las cantidades de los componentes están involucradas en las características finales del producto. Las técnicas de producción para CMM se clasifican básicamente en cuatro tipos según el estado de la matriz durante el proceso:

- En estado líquido (fundición, infiltración).
- En estado sólido (metalurgia de polvos, sinterización, prensado en caliente).
- En estado semisólido (compocasting).
- En estado gaseoso (deposición de vapor o electrodeposición).

Los procedimientos utilizados para su fabricación como se puede observar en la Figura 2.4 determinan en gran proporción las características mecánicas del compuesto, es por eso que en la actualidad una de las técnicas de mayor importancia para su producción es la metalurgia de polvos [11].





**Fig. 2.4.** Esquema de los principales procesos para producción de compuestos de matriz metálica [12].

### **2.1.6 Interface Matriz/Refuerzo**

La zona de la interfase es una región con una composición química variable, es donde ocurre la unión entre la matriz y el refuerzo, lo que asegura la transferencia uniforme de las cargas aplicadas entre ambos y condiciona las propiedades mecánicas finales de los compuestos.

En comparación con los materiales sin refuerzo, la microestructura y las interfaces de los CMM no pueden considerarse de forma aislada, están mutuamente relacionadas. Las interacciones y las reacciones químicas entre la matriz y el refuerzo modifican las características de los CMM y afectan su adhesión y propiedades mecánicas de forma significativa.

En aplicaciones a alta temperatura, la microestructura de los CMM debe permanecer estable durante largos períodos de servicio. La estabilidad térmica y la fractura están determinados por los cambios en el microestructura y en las interfaces, por ejemplo, procesos reacción y precipitación.

La formación de la interfaz entre la matriz y la fase de refuerzo tiene una influencia significativa en la producción y características de los compuestos de matriz metálica (CMM). La adhesión entre ambas fases es generalmente determinada por la interacción entre ellos. Durante la producción de la fusión de la matriz por ejemplo, por infiltración, la mojabilidad llega a ser significativa.

Existen algunas cualidades necesarias para garantizar una unión interfacial adecuada entre la matriz y el refuerzo: una buena mojabilidad del refuerzo por parte de la matriz metálica, que asegure un contacto inicial para luego, en el mejor de los casos, generar la unión en la interface una estabilidad termodinámica apropiada (ya que al interactuar estos materiales, la excesiva reactividad es uno de los mayores inconvenientes encontrados). La existencia

de fuerzas de unión suficientes que garanticen la transmisión de esfuerzos de la matriz al refuerzo y que sean además estables bajo altas temperaturas [9].

### **2.1.7 Propiedades y Comportamiento de los CMM**

Como ya se mencionó antes, el uso de los CMM ha sido de gran importancia para la industria en los últimos años gracias a la mejora en sus propiedades, tales como módulo de elasticidad, tenacidad, resistencia al desgaste, resistencia a la fatiga y excelentes propiedades tanto conductoras como térmicas. Al tratarse de un material compuesto dichas mejoras son hechas no solo en uno, sino en dos materiales diferentes, propiedades como la ductilidad y la tenacidad del metal en el caso de las matrices y resistencia en el caso de los refuerzos cerámicos, la combinación de estas propiedades les hace mucho más rentables en comparación con materiales sin refuerzo.

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos reforzados están dadas por el comportamiento de las aleaciones de la matriz. La elección del metal para la matriz está en función de las aplicaciones previstas. Tomando como ejemplo el uso del titanio el cual parece ser una buena opción gracias a que presenta una alta resistencia para aplicaciones de moderada temperatura. No obstante, el aluminio puede competir con las propiedades de las aleaciones de titanio, además de que es un material de mucho menor costo en comparación con el titanio.

Uno de los factores más importantes es la compatibilidad del material de la matriz con el refuerzo. La compatibilidad en este caso significa que no hay reacciones químicas indeseables en la interface de la matriz y el refuerzo, dando lugar a unas propiedades mecánicas óptimas.

Dichas reacciones pueden dar origen a la formación de compuestos intermetálicos en la interface, lo cual que puede tener un efecto nocivo en la transferencia de carga a los refuerzos [11].

### **2.1.8 Mecanismos de Endurecimiento por Deformación Plástica en un Material Compuesto A6061/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/22p**

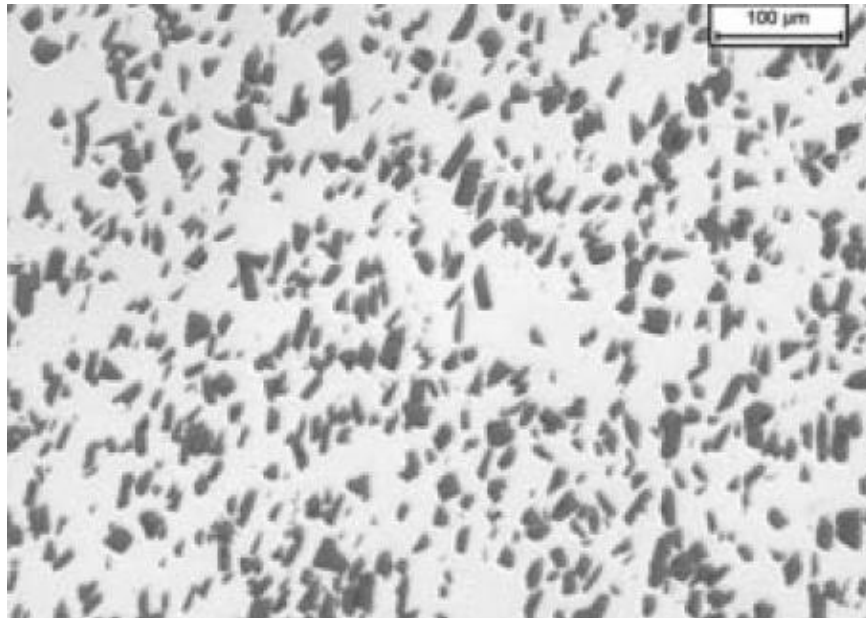
Como ya hemos mencionado antes las propiedades de los CMM están en función de distintos factores así como del tipo de aleación y de refuerzo utilizado, el porcentaje en volumen, forma, tamaño y distribución de las partículas reforzantes, así como del proceso de fabricación empleado.

Resulta de gran importancia poder describir el endurecimiento de un material cuando es deformado plásticamente, ejemplo de ello es la utilización del análisis, mediante microscopía, del material una vez fracturado, ya que es una herramienta útil para determinar los mecanismos de deformación plástica y de fractura del material.

El artículo analizado, muestra los estudios sobre los mecanismos de endurecimiento por deformación plástica y de daño en un material compuesto A6061/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/22p, en diferentes estados metalúrgicos y ensayados a tracción para determinar los mecanismos de daño en los materiales compuestos: la fractura frágil de las partículas, la decohesion matriz-refuerzo y la fractura dúctil de la matriz correspondiente aleación. Los materiales analizados en el artículo son la aleación de aluminio A6061 la cual fue reforzada con un 22% en volumen de partículas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (A6061/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/22p) y la correspondiente aleación monolítica (A6061) [33].

En el material compuesto se observa una distribución homogénea de partículas en la matriz cómo es posible apreciar en la Figura 2.5. Los cristales

de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  forman aglomerados por lo que hay zonas sin partículas en la estructura de la matriz, con lo cual podemos apreciar que se trata de una estructura heterogénea y susceptible a defectos. El tamaño medio de las partículas es de  $13.6 \mu\text{m}$  y tienen un factor de forma, definido como ancho/largo, de 0.58.



**Fig.2.5.** Micrografía del material A6061/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /22p [33].

Con el fin de conocer la resistencia y flujo plástico de los materiales estudiados en diferentes estados metalúrgicos se realizó un recocido en tres etapas: una primera de mantenimiento de las probetas a  $415^\circ\text{C}$  durante 3h, una segunda de enfriamiento en el horno a una velocidad de  $30^\circ\text{C/h}$  hasta los  $260^\circ\text{C}$ , y una última de enfriamiento libre en el horno hasta temperatura ambiente se aplicó un tratamiento térmico de recocido (O), un envejecimiento natural (T4) y un envejecimiento artificial (T6).

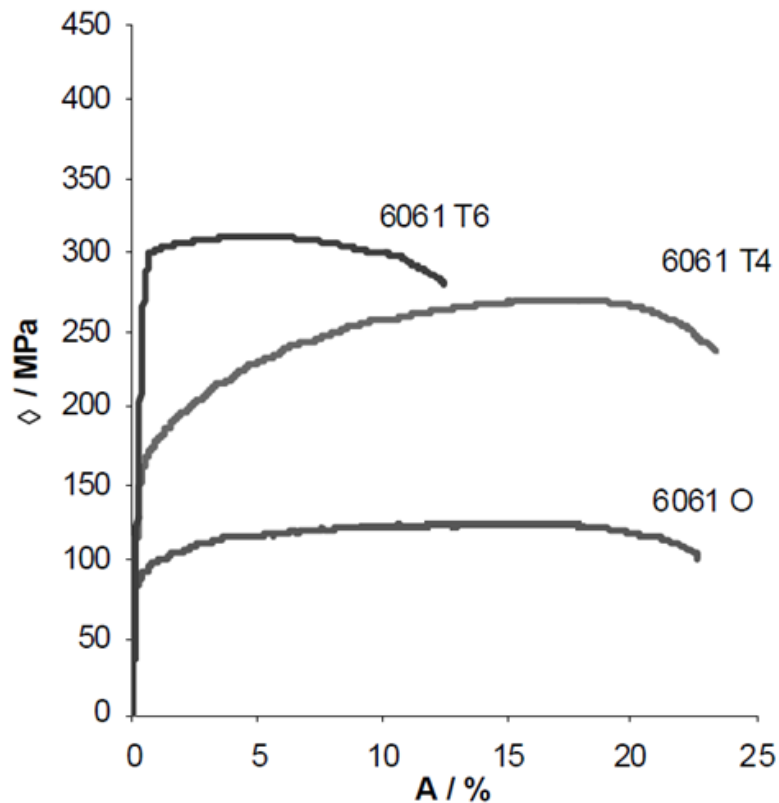
En la Tabla 2.3 se ilustran las propiedades mecánicas de los materiales estudiados donde se indican los valores del límite elástico, la resistencia a tracción y el alargamiento es notable el aumento de la resistencia a tracción del material compuesto en comparación con la aleación de aluminio 6061.

El tratamiento térmico de recocido es de mayor relevancia con (30%) y con el T6 (27%), siendo del 15% en el caso del T4. En ambos materiales el envejecimiento artificial, T6, es el que nos proporciona la máxima resistencia mecánica, acompañada de un notable decremento en la ductilidad.

**Tabla 2.3.** Propiedades mecánicas de los materiales A6061 y A6061MMC en los diferentes estados metalúrgicos [33].

Material	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_R$ /MPa	A/%
6061 O	90	124	22.7
6061 T4	165	270	23.3
6061 T6	297	312	12.4
6061 MMC o	81	161	15.1
6061 MMC T4	201	310	7.9
6061 MMC T6	365	396	2.2

A continuación la Figura 2.6 ilustra como el tratamiento térmico T4 en la aleación de aluminio proporciona un aumento en la resistencia, del mismo modo mantiene el grado de ductilidad del material recocido.



**Fig. 2.6.** Curvas tensión-deformación para la aleación A6061 O, A6061 T4 y A6061 T6 [33].

El incremento de la resistencia en los materiales compuestos, respecto a las correspondientes aleaciones de aluminio, puede decirse que son debido a los cambios microestructurales que surgen al incorporar las partículas cerámicas. Gracias a que el coeficiente de expansión térmica de las partículas reforzantes es menor que el de la matriz, no sin mencionar que los cambios de temperatura que se producen en el proceso de conformado y tratamientos térmicos propician la aparición de tensiones residuales en la interface matriz refuerzo. Al relajar las tensiones generadas debido a la deformación plástica de la matriz se propicia un endurecimiento en el material y por ende la generación de dislocaciones. El refinamiento en precipitados durante los tratamientos térmicos de envejecimiento al igual propicia el endurecimiento de la matriz, ya que dificultan el movimiento de las dislocaciones.

Del artículo analizado se puede concluir que al añadir partículas reforzantes de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se incrementa la resistencia mecánica de la aleación 6061, disminuyendo su plasticidad por otro lado al aplicar tratamientos térmicos de envejecimiento se logra mejorar la resistencia a tracción del material compuesto, siendo mayor el incremento en el estado T6 que en el T4.

Los precipitados formados durante el tratamiento térmico, y la alta densidad de dislocaciones generadas en la interface matriz-refuerzo, disminuyen la capacidad de endurecimiento de la matriz de aluminio.

Es posible apreciar que en un material recocido se obtiene una matriz con una distribución más homogénea de las deformaciones y, por tanto, una mayor capacidad de endurecimiento. Para un material con tratamiento T4, el mayor espaciado entre precipitados y su menor tamaño originan un menor grado de endurecimiento inicial de la matriz con respecto al estado T6 y, consecuentemente, una mayor capacidad de endurecimiento por deformación en las primeras etapas de deformación plástica [33].

## **2.2 Soldabilidad de los Compuestos de Matriz Metálica**

Existe una gran diversidad de métodos de soldadura aplicables a estos materiales, aun así cabe aclarar que la resistencia de las uniones soldadas por procesos de soldadura por fusión puede llegar a ser similares a los de matriz sin refuerzo, la eficiencia de la unión será normalmente inferior. Sin embargo, dado que la zona de fusión carece de refuerzo, la rigidez en dicha zona será inferior, y la ductilidad puede ser superior.

La Tabla 2.4 ilustra los métodos de soldadura más utilizados para compuestos de matriz de aluminio reforzados con partículas de SiC y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [13].



**Tabla 2.4.** Procesos de soldadura utilizados en los compuestos de matriz de aluminio [13].

<b>PROCESOS DE SOLDADURA PARA Al(CMM)</b>		
<b>Soldadura por fusión</b>	<b>Métodos de unión en estado semisólido</b>	<b>Métodos de unión en estado sólido</b>
*Soldadura TIG y MIG *Soldadura por resistencia *Soldadura por láser *Soldadura por haz de electrones (EBW)	*Soldadura fuerte(Brazing) *Soldadura blanda (Soldering)	*Unión por difusión *Unión por fricción *Unión adhesiva *Unión mecánica

La soldadura por fricción rotativa, la cual se considera un método de unión en estado sólido, consiste en aplicar un rozamiento continuo entre las entercaras de una unión manteniendo uno de los componentes fijo en contacto con otro sometido a un movimiento de rotación, todo ello bajo la acción de una presión axial (presión de fricción), la cual, genera un calentamiento en la intercara con el consiguiente reblandecimiento del material (sin llegar a alcanzar el punto de fusión). Posterior a esto comienza a fluir plásticamente formándose un rebosamiento del mismo en la junta. Después de un tiempo determinado se suspende la fricción, manteniéndose una presión, que puede ser ligeramente mayor que la presión inicial para consolidar la soldadura. Teniendo en cuenta los resultados positivos obtenidos con este proceso de soldadura para la unión de metales con una gran diferencia en sus puntos de fusión, se pensó en la utilización de esta técnica en uniones disimilares metal/cerámico.

Estudios recientes demuestran que los procesos en estado sólido pueden ser utilizados con éxito en la unión de una gran variedad de materiales compuestos. Las principales ventajas de los procesos de soldadura en estado sólido frente a los de fusión se resumen en que: no se forman fases fundidas, gracias a esto no existen fases frágiles en el material, y se evitan los problemas de viscosidad y segregación de partículas tales como  $Al_2O_3$  o SIC [13].

### **2.2.1 Procesos de Soldadura por Arco TIG y MIG Aplicados a CMM**

Estos procesos de soldadura por tratarse de métodos por fusión, presentan un gran número de problemas que ya se han descrito como formación de fases débiles, deformación de la matriz, reacciones entre matriz/refuerzo además de: descomposición o disolución de fibras debido a las altas temperaturas durante la soldadura, así como formación de grietas y poros, dado que la escasa

mojabilidad entre la fibra y la matriz metálica líquida no cumple con las condiciones ideales [13].

Por otra parte, debido a la mayor viscosidad de los baños de fusión de los CMM respecto a los materiales de la matriz y debido a la diferente conductividad térmica de ambos materiales, se produce una variación en la forma del baño de fusión final, además, debido a la reducción de conductividad térmica y eléctrica respecto a la matriz, las uniones permiten, para los mismos parámetros eléctricos, sin embargo, la mayor fluidez puede repercutir en una acumulación atrapada de gases en la zona de fusión y por otra parte, el movimiento de las partículas puede conducir a que estas se acumulen en ciertas zonas y se produzca una unión muy heterogénea.

Las investigaciones realizadas hasta el momento, indican que los resultados obtenidos sobre la soldadura de materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con partículas discontinuas dependen en gran medida de las características de la matriz y del aporte.

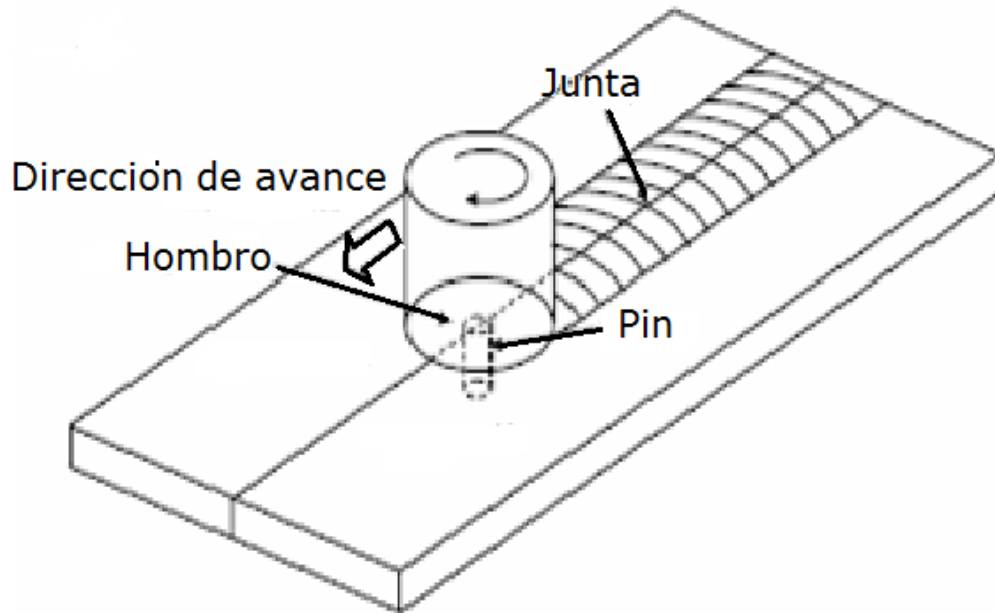
El proceso MIG, sin embargo, es el más utilizado en la producción de soldaduras debido a su fácil automatización y a su elevada razón de deposición. Por este último motivo, mientras que para espesores finos se utiliza preferentemente el proceso TIG, en uniones con espesores mayores de 3 mm generalmente se prefiere utilizar soldadura MIG. Por otro lado, después de realizar un tratamiento térmico post-soldadura se consigue incrementar la resistencia de la zona de la unión [13].

## 2.3 Proceso de Soldadura por Fricción (FSW)

A principios de la última década, el TWI “Technological Welding Institute” de Inglaterra, dio a conocer un nuevo método de soldadura en fase sólida para la soldadura del aluminio y sus aleaciones, la cual es nombrada soldadura por fricción agitación ó “Friction Stir Welding” (FSW) por sus siglas en inglés. Este nueva variante de la soldadura por fricción permite la soldadura de piezas planas de gran extensión. La coalescencia de los materiales se produce mediante una herramienta de rotación que se introduce y avanza a lo largo de la junta [14].

Aunque al inicio fue desarrollado para soldadura en Aluminio, en la actualidad se aplica a una gran variedad de materiales como el Cobre, Magnesio, Titanio, Acero, juntas disímiles, materiales compuestos, incluso polímeros, etc. [27].

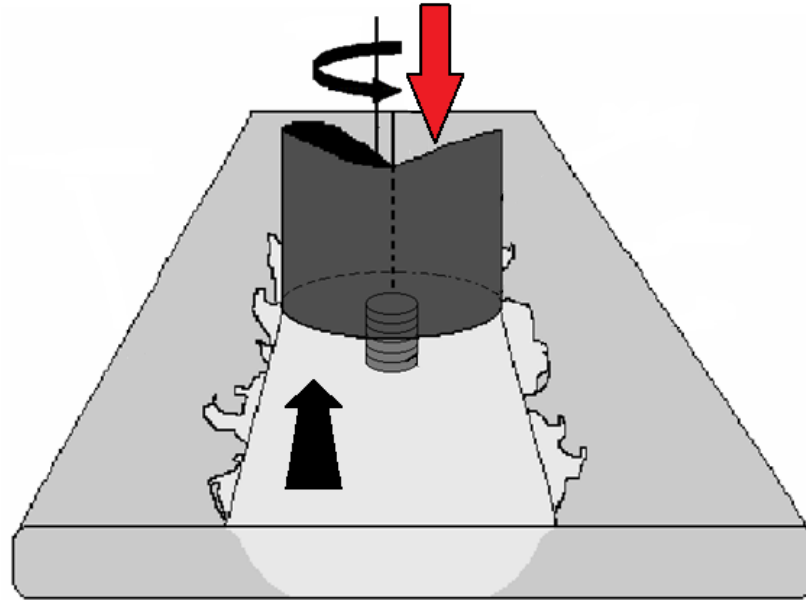
El proceso básico consiste en rotar una herramienta que cilíndrica y un pin. La herramienta se hunde en la línea de soldadura hasta que el hombro se pone en contacto con la superficie de la placa. Una vez que el material es calentado lo suficiente, debido a la fricción, y pasar al estado plástico, la herramienta atraviesa a lo largo de la línea de soldadura y el material plastificado se saca más allá del perno de rotación como se aprecia en la Figura 2.7.



**Fig. 2.7.** Proceso de soldadura por fricción FSW [27].

Es un proceso automático que permite soldar juntas a tope y a traslape de gran longitud y por consiguiente supera la mayor limitación del proceso convencional por fricción que consiste precisamente en la restricción de su aplicación a piezas simétricas y compatibles en forma y tamaño para poder rotarse y generar fricción entre sí. La soldadura por fricción se basa esencialmente en la utilización de una herramienta cilíndrica de un perfil especial, la cual se inserta entre las superficies de contacto de dos placas, durante el proceso las variables más importantes a tomar en cuenta son la velocidad de rotación y la presión aplicada sobre la herramienta. Es importante que las piezas estén a tope o superpuestas para evitar su movimiento cuando avanza la herramienta a lo largo de la junta.

La presión, fricción, y agitación que genera dicha herramienta forja, y agita la unión al estar en estado pastoso, como es posible observar en la Figura 2.8.



**Fig. 2.8.** Acción de la herramienta sobre la junta, nótese la agitación del material en el área soldada [30].

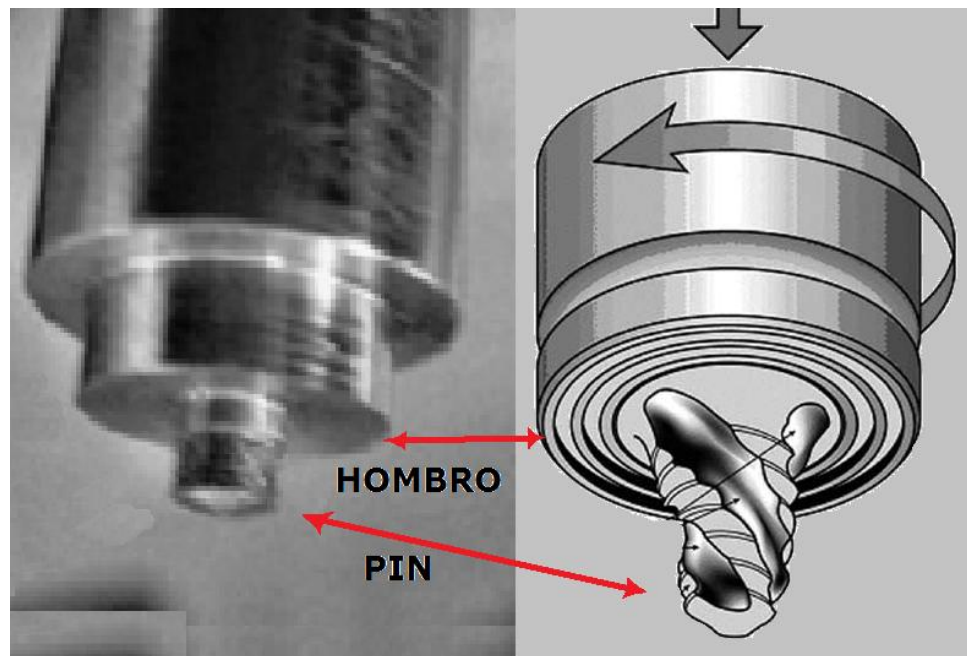
### 2.3.1 Componentes y Equipo

A partir de los conocimientos obtenidos al soldar placas de aleaciones de aluminio 2, 3, 5 y 10 mm de espesor, se diseñó una herramienta para la soldadura en placas de hasta 6.25 mm de espesor. Con dicha herramienta se produjeron soldaduras con buen acabado superficial, sin defectos internos, que al aplicar los respectivos ensayos de plegado y tensión, los resultados han sido bastante satisfactorios.

Como equipo de soldadura es común que se utilice una máquina fresadora, aunque en la actualidad existen fabricantes que ofrecen máquinas exclusivamente desarrolladas para este proceso, las cuales cuentan con una potencia en el eje de al menos 3 KW con capacidad de inclinación de torreta, las dimensiones en la mesa 1000 x 350 mm, las revoluciones de la herramienta varían entre 75 y 4500 r.p.m., mientras que las velocidades de avance transversal y/o longitudinal oscilan entre 0 y 20 mm/s [14].

La geometría de la herramienta es el aspecto más influyente del proceso ya que tiene un papel crítico en el flujo del material y, a su vez regula la velocidad de desplazamiento.

La herramienta consiste en un hombro y un pin como se muestra esquemáticamente en la Figura. 2.9 Como se mencionó anteriormente, la herramienta tiene dos funciones principales: (a) Calentar localmente el material, y (b) promover el flujo de material.



**Fig. 2.9.** Herramienta utilizada para el proceso FSW, se muestra el hombro y el pin en 2 tipos de herramientas diferentes [27,31].

En la etapa inicial de la herramienta, el calentamiento se debe principalmente a la fricción entre el poste y la pieza por la acción de la herramienta al sumergirse hasta que el hombro toca la pieza de trabajo. La fricción entre el hombro y el componente a soldar depende del tamaño relativo de pin y el hombro por tales variables es importante, el diseño y características de la herramienta.

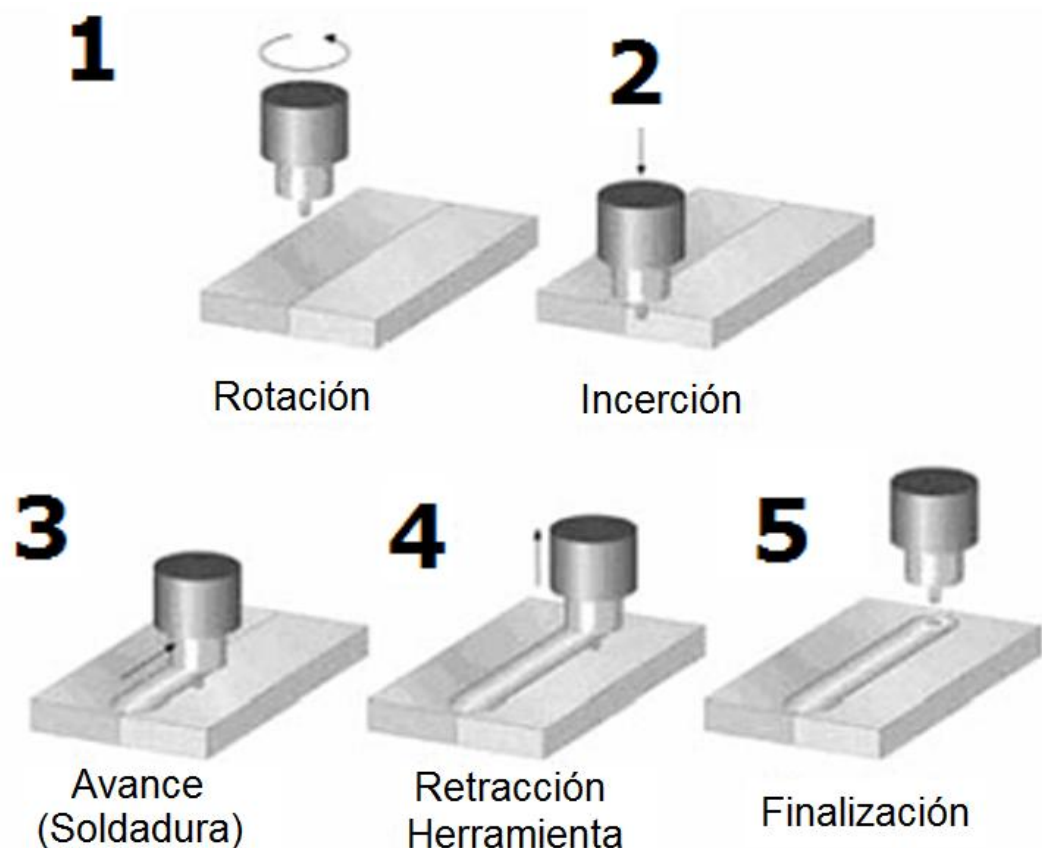
Otra función importante del hombro es que también proporciona aislamiento para el volumen de material que fluye durante el proceso, esto se explica claramente con la Figura 2.10. La segunda función de la herramienta es "agitar" y "mover" el material, de esto depende la uniformidad de la microestructura y propiedades [31].



**Fig. 2.10.** Esquema representativo de la acción del pin y del hombro que también proporciona aislamiento para el volumen de material que fluye durante el proceso [31].



El calor generado por la fricción en el hombro, y en menor medida en el pin lleva al material a un estado plástico. A medida que la herramienta se traslada en la junta se produce un flujo del material plastificado alrededor de la herramienta, el material es transportado (agitado) y forjado dentro de la junta como se aprecia en la Figura 2.11 [27].



**Fig. 2.11.** Secuencia de la acción de la herramienta y sus componentes durante el proceso de soldadura [27].

La sujeción de las piezas se efectúa mediante un soporte construido para tal fin, el cual además ocupa la función de respaldo. El soporte a su vez se sujeta a la mesa de trabajo mediante bulones, como se observa en la Figura 2.12 [14].



**Fig. 2.12.** Cuerpo, hombro de la herramienta, y soportes sujetadores [14].

## **2.3.2 Variables que Afectan el Proceso**

### **2.3.2.1 Presión de la Herramienta**

La presión influye notablemente en la temperatura generada por la fricción. Un exceso de presión produce una soldadura con una unión que pudiera ser o no deficiente en el centro esto en función del intervalo de presión y consecuentemente el rango de calentamiento efectivo.

Los intervalos de presión para el calentamiento y el forjado también son amplios, aunque las presiones seleccionadas deberán ser reproducibles para cualquier operación específica. La presión controla el gradiente de temperatura en la zona de soldadura, la potencia de impulso requerida y el acortamiento axial. La presión específica depende de los metales que se van a unir y de la geometría de la unión. Se puede usar la presión para compensar la pérdida de calor a una masa grande, como cuando se suelda un tubo a una placa. La presión de calentamiento debe ser suficiente para mantener las superficies de empalme en contacto íntimo y evitar la oxidación. Para una velocidad de eje

determinada, una baja presión limita el calentamiento con poco o ningún acortamiento axial. Una presión elevada causa calentamiento local hasta una temperatura muy alta y un acortamiento axial rápido. En el caso del acero de bajo carbono, la tasa de acortamiento axial es aproximadamente proporcional a la presión de calentamiento [15].

En muchos metales, incluidos los aceros, la calidad de la unión mejora cuando se aplica una mayor fuerza de forjado al final del periodo de calentamiento. Para los aceros, el intervalo de presiones que puede aplicarse obteniendo buenas soldaduras es bastante amplio. En el caso del acero de bajo carbono, son aceptables presiones de calentamiento de 4500 a 8700 psi (31 a 60 MPa) y presiones de forjado de 11000 a 22000 psi (76 a 152 MPa). Los valores de uso más común son de 8000 y 20000 psi (55 y 138 MPa), respectivamente. Algunas aleaciones de buena resistencia mecánica en caliente, como los aceros inoxidable y las aleaciones con base de níquel, requieren presiones de forjado más altas. Si se desea un efecto de "precalentamiento" para hacer menos rápido el enfriamiento, puede aplicarse una presión de cerca de 3000 psi (21 MPa) durante un tiempo breve al principio del ciclo de soldadura; luego se aumentará la presión hasta la temperatura óptima para soldar [15].

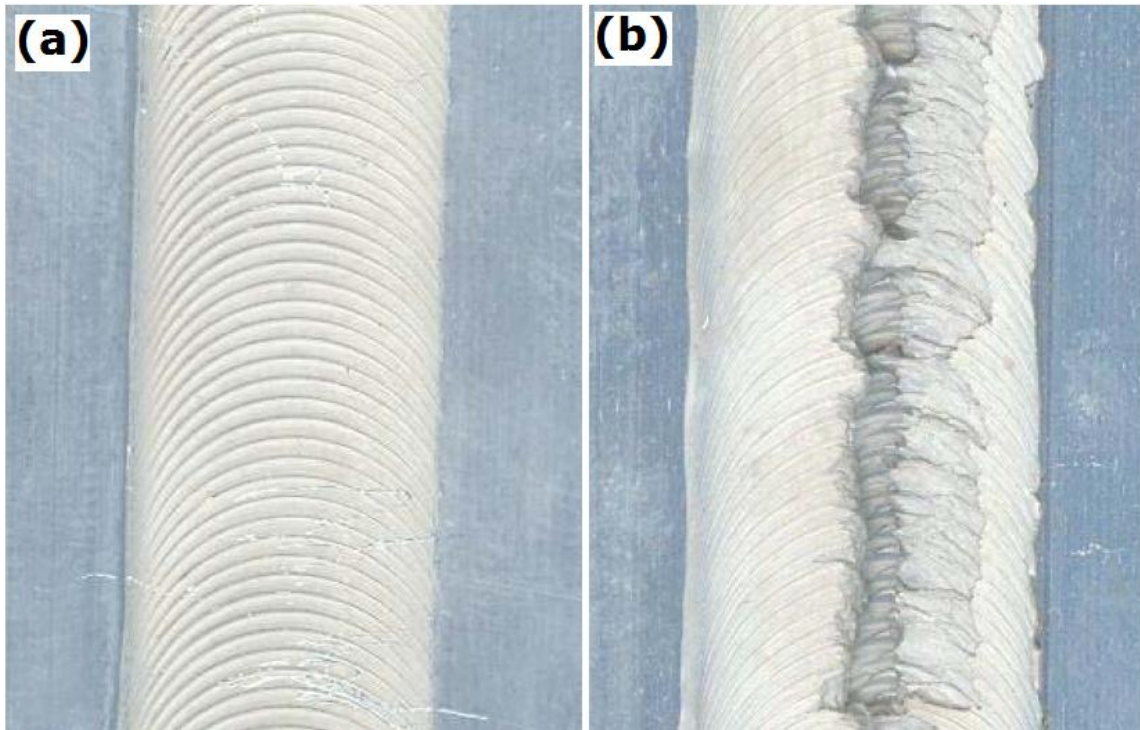
Para tener éxito en la soldadura se debe tener el equipo adecuado que este diseñado para una efectiva interacción de las fuerzas que actúan como parámetros esenciales del proceso de soldadura [25].

Supongamos que hablamos de diferentes parámetros para un material del mismo grosor, en este caso la velocidad de soldadura. Como ejemplo, tendremos un espesor de 5 mm de aluminio 6082 con una junta a tope T6 se puede soldar a baja velocidad con una carga cierta, con un avance de 6 m / min necesita de ocho a diez veces más alta carga. Por lo tanto la fuerza de reacción de la pieza de trabajo hacia el equipo está cambiando de la misma manera [25].

Dichos parámetros de soldadura para este ejemplo, tienden a de separar las piezas entre si, por lo que las fuerzas de sujeción son también de una cierta magnitud. Estas son reglas muy simples y para estimar la capacidad de equipos y las fuerzas de sujeción necesarios [25].

Una superficie de contacto apropiada para las piezas de trabajo se debe mantener constante de lo contrario la fricción y disminuye la calidad de la soldadura será pobre. Debido a esto podrían presentarse problemas tales como efecto de la herramienta sobre el material de manera "muy profunda" (hombro de la herramienta de 0.2 a 0.3 mm por debajo de la nivel de la superficie), o tener un gran ángulo de inclinación de la herramienta (conseguir más presión en la parte posterior del hombro) [25].

El mejor resultado de la soldadura siempre se logra con el control de la fuerza que tiene el equipo y que asegure un buen contacto con el material durante el proceso. La Figura 2.13 muestra una comparación de dos placas soldadas a la misma velocidad de rotación, pero en la figura (a) se tiene el control de la presión aplicada así como un control en la postura de la herramienta. La diferencia de calidad es evidente [25].



**Fig. 2.13.** Diferencia al momento de soldar con el control de parámetros (a) y con el control de la posición. Mientras que en la figura (b) los parámetros de soldadura: la velocidad de 2 m/min, velocidad de rotación de la herramienta 1800 rpm, fuerza vertical hacia abajo en el lado izquierdo de 800 kg. Ambas muestras fueron soldadas con la misma máquina [25].

### 2.3.2.2 Velocidad de Recorrido

La función de la rotación es producir una velocidad relativa en las superficies de empalme. Desde el punto de vista de la calidad de la soldadura, la velocidad casi nunca es una variable crítica; esto es, puede variar dentro de un rango de tolerancia amplio y aún así producir soldaduras firmes. Para el caso del acero, la velocidad tangencial deberá ser del orden de 1.3 m/s (250 pies/min), tanto para piezas de trabajo sólidas como tubulares. Las velocidades tangenciales por debajo de 1.3 m/s producen pares de torsión muy altos que causan problemas de sujeción del trabajo [15].

### **2.3.2.3 Tiempo de Calentamiento**

Para una aplicación en particular, el tiempo de calentamiento se determina durante la preparación o con base en la experiencia previa. Un tiempo de calentamiento excesivo limita la productividad y desperdicia material; un tiempo insuficiente puede producir calentamiento no uniforme así como el atrapamiento de óxidos y áreas no adheridas en la interfaz. El calentamiento no uniforme es típico de las soldaduras por fricción en barras. Cerca del centro de la barra en rotación, la velocidad superficial puede ser demasiado baja para generar un calentamiento adecuado, de modo que debe haber difusión térmica desde la porción exterior de la superficie de empalme para que la unión global sea firme. El tiempo de calentamiento puede controlarse de dos maneras. La primera es con un dispositivo de cronometría apropiado que detenga la rotación al final de un lapso previamente determinado.

El tiempo de calentamiento disminuye al aumentar la presión de calentamiento; también disminuye con la velocidad si se mantiene constante la presión de calentamiento [15].

### **2.3.2.4 Flujo de Material y el Mecanismo de Unión**

La mayor parte del flujo del material se produce por el lado detrás de la herramienta. Hay tres tipos de flujo, que afecta el transporte de material plastificado en el proceso FSW [32].

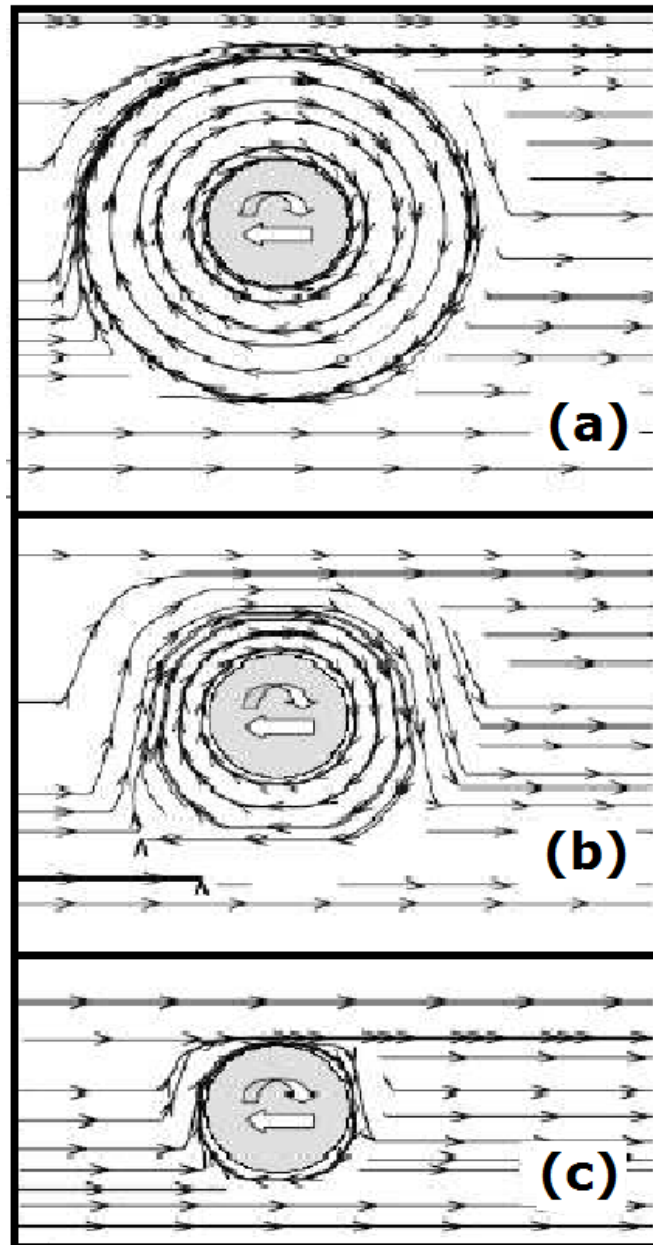
En primer lugar, cerca de la herramienta, parte del material plastificado gira alrededor de la herramienta. Este movimiento es impulsado por la rotación de la herramienta y la fricción resultante entre la herramienta y la pieza de trabajo.

En segundo lugar, movimiento de rotación del tornillo sin cabeza tiende a empujar el material hacia abajo cerca de la clavija de la que unidades de un movimiento hacia arriba de una cantidad equivalente de material de algo más lejos. Por último, hay un movimiento relativo entre la herramienta y la pieza. El movimiento general del material plastificado.

Los modelos de flujo de plástico para FSW se han utilizado para predecir las velocidades alrededor del pin de la herramienta. Las velocidades también se han estimado a partir de velocidades de deformación que, a su vez, se obtuvieron a partir de la correlación entre el tamaño de grano y la velocidad de deformación.

Actualmente se utiliza modelación numérica del flujo de plástico ya que puede ayudar en el diseño de herramientas y la optimización del proceso.

La Figura 2.12 Muestra las líneas de corriente que indican la presencia de zonas de rotación, lo que muestra claramente el flujo de recirculación del material alrededor del perno de la herramienta. El espesor de la región de recirculación de flujo de material se ve afectado por las propiedades del material, los parámetros de del proceso y la velocidad de transferencia de calor en la herramienta, esta zona ocupa grandes áreas en los planos de elevación más alta debido a un mayor impulso y un transporte desde el hombro de rotación por lo tanto las líneas de flujo indican que más allá de la región de recirculación de flujo plástico, es decir, en la zona de transición, la transferencia de material se produce principalmente en el lado de retirada. La Figura 2.14 también muestra un cambio de flujo en el lado de avance de cerca del pin, lo que lleva a una zona de estancamiento, que se forma cerca del pin en elevaciones más bajas [32].



**Fig. 2.14.** Flujo del material plastificado por acción de la fricción en diferentes planos horizontales (a) 0,35 mm, (b) 1,59 mm y (c) 2,28 mm por debajo de la superficie superior de una placa de acero inoxidable 304 de 3,18 mm de espesor. Velocidad de soldadura de 4 mm s<sup>-1</sup> con rotación de la herramienta a 300 rpm [32].



Una consecuencia importante de la falta de flujo de material adecuado en el lado de avance se ha relacionado con la formación de defectos llamados "agujeros de gusano".

Las líneas de corriente muestran que más allá de la zona de giro el transporte de material se produce principalmente por el lado en retirada. Visualización de flujo mediante trazadores también indica la presencia de una zona donde el material gira y avanza con la herramienta y la zona de transición donde el material se mueve en el lado de retirada [32].

### 2.3.2.5 Relaciones Entre las Variables

En este método intervienen tres variables de soldadura: el momento de inercia del volante, la velocidad inicial del volante y la presión axial la Tabla 2.4 muestra el efecto de las variables sobre el material. Las primeras dos variables determinan la energía cinética total disponible para efectuar la soldadura. La magnitud de la presión generalmente se basa en el material que se va a soldar y en el área de empalme. La energía que tiene el volante en cualquier instante durante el ciclo de soldadura está dada por la ecuación (1) [15]:

$$E = \frac{IS^2}{C}$$

Donde:

**E** = Energía, J

**I** = Momento de inercia, Kg·m<sup>2</sup>

**S** = Velocidad, rpm

**C** = 182.4 Kg·m<sup>2</sup>

**Tabla 2.5.** Principales parámetros y efectos del proceso FSW [25].

<b>PRINCIPALES PARAMETROS DEL PROCESO FSW</b>	
<b>PARAMETRO</b>	<b>EFFECTOS</b>
Velocidad de rotación	Calor por fricción “agitación”, rompimiento de la capa de oxido.
Angulo de inclinación	Apariencia del cordón (adelgazamiento)
Velocidad de recorrido	Apariencia, control del calor
Presión	Calor y fricción

## **2.4 Ventajas y Limitaciones de la Soldadura por Fricción**

### **2.4.1 Ventajas de la Soldadura por Fricción**

Entre las ventajas fundamentales del método se encuentran:

- Capacidad de unión de aleaciones de difícil soldabilidad, soldadura de 15 mm de espesor en una pasada y 30 mm en dos sin necesidad de biseles
- Ausencia de metal de aporte y gas de protección
- Ausencia de distorsión
- No hay generación de humos tóxicos
- Las propiedades mecánicas y sanidad de las uniones producidas resultan en general superiores a las obtenidas por procesos de arco convencionales.
- El proceso es fácil de automatizar para la producción en masa.
- Las soldaduras se efectúan con rapidez en comparación con otros procesos de soldadura.
- Los requerimientos de planta (espacio, potencia, cimientos especiales, etc.) son mínimos.

- No se requiere metal de aporte.
- No hace falta fundente ni gas protector.
- El proceso es limpio desde el punto de vista ambiental; no hay arcos, chispas, humo ni vapores generados cuando las piezas están limpias.
- La limpieza superficial no es tan crítica, en comparación con otros procesos de soldadura, ya que la soldadura por fricción tiende a romper y desplazar las películas superficiales.
- Las zonas térmicamente afectadas son angostas.
- La soldadura por fricción es apropiada para soldar la mayor parte de los materiales de ingeniería y se presta para la unión de muchas combinaciones de metales disímiles.
- En la mayor parte de los casos, la resistencia mecánica de la soldadura es equivalente o superior a la del más débil de los dos materiales que se unen.
- No es necesario que los operadores tengan habilidades de soldadura manual [15].

#### **2.4.2 Limitaciones de la Soldadura por Fricción**

Éstas son algunas de las limitaciones del proceso:

Las restricciones fundamentales son:

- Una reducida versatilidad propia de un proceso automático
- Necesidad de firme sujeción de las piezas
- Aplicación limitada a piezas planas o de gran radio de curvatura
- La preparación y alineación de las piezas de trabajo puede ser crucial para que el frotamiento y el calentamiento sean uniformes, sobre todo cuando los diámetros exceden los 50 mm (2 pulgadas).
- Los costos de capital por equipo y herramental son elevados.
- No es posible soldar materiales de lubricación seca ni no forjables.

- Si las dos piezas tienen más de 1 m (3 pies) de longitud, se requieren máquinas especiales.
- Las aleaciones de maquinado libre son difíciles de soldar [15].

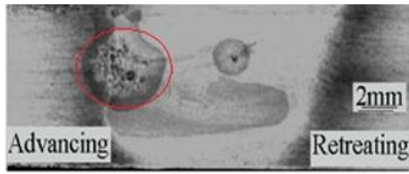

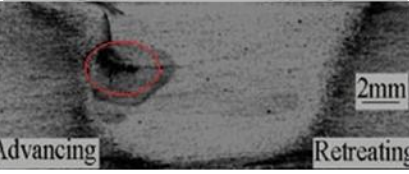
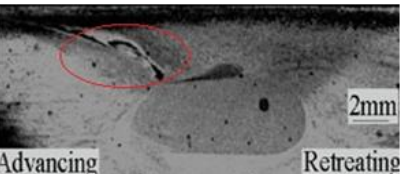


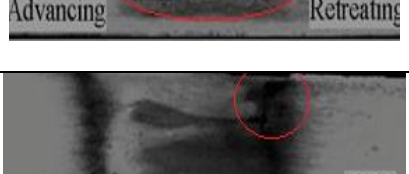
## **2.5 Soldadura por Fricción Aplicada a los Al (CMM)**

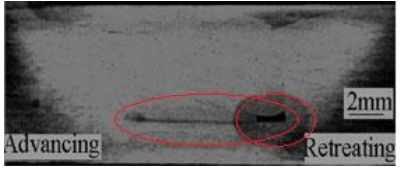


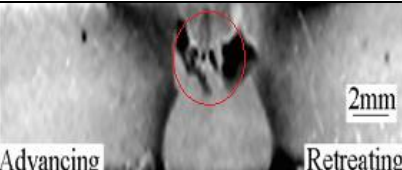
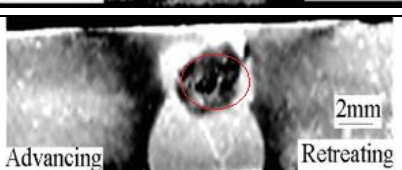
Debido a las pocas propiedades de soldabilidad de los CMM en cuanto a soldadura por fusión se refiere, la soldadura por fricción-agitación (FSW) ha sido de gran importancia para este campo como una técnica de soldadura en estado sólido ya que resulta ser un eficiente método de unión de los CMM.

Este proceso de soldadura, como técnica de unión en estado sólido, es ideal para a las aleaciones de aluminio de alta resistencia. La soldadura por fricción puede eliminar los defectos como porosidad y segregación, en caso de que el proceso de producción se haya llevado a cabo por fundición. Muchos de los problemas metalúrgicos se asocian al uso de técnicas de soldadura con arco eléctrico, como lo son la generación de grietas, poros, rechupes y otros problemas causados por un enfriamiento rápido, así como la aparición de tensiones residuales lo cual tiene un impacto negativo en la vida útil del material. Debido a que el proceso utiliza fricción la resistencia a la tracción y resistencia a la fatiga de las aleaciones se ve regulada a través de su efecto sobre el flujo plástico en los procesos de soldadura por fricción [17,19].

## 2.5.1 Defectos en Uniones de CMM Soldadas con FSW

**Tabla 2.6.** Defectos comunes en la soldadura FSW aplicada a CMM [32].

DEFECTOS COMUNES EN FSW				
PARAMETROS DE ENTRADA	RANGO	MACROESTRUCTURA	DEFECTO	PROBABLE RAZON
Velocidad de rotación	< 800 rpm		Agujero de gusano	Generación insuficiente de calor y transportación de material
Velocidad de rotación	>1200 rpm		Poros	Aumento en la turbulencia del material plastificado
Velocidad de recorrido	<30 mm/min		Poros	Exceso de calor por unidad de longitud
Velocidad de recorrido	>130 mm/min		Poros	Al incrementar la velocidad decrece la plastificación del material
Fuerza axial	< 3 kN		Agujero de gusano	Insuficiente fuerza axial y una inadecuada generación de calor
Fuerza axial	>11 kN		Poros túnel	Al incrementar la fuerza axial se produce una excesiva entrada de calor, y el adelgazamiento en la zona de soldadura
Diámetro del hombro	< 9 mm		Poros	Agitación insuficiente de la junta

Diámetro del hombro	> 21 mm		Poro	entrada excesiva de calor debido al reblandecimiento y endurecimiento del material
Diámetro del pin	< 3 mm		Poro	Alta generación de calor y transportación de material insuficientes
Diámetro del pin	> 7 mm		Poro túnel	Excesivo calor de entrada debido a la plastificación del material
Dureza de la herramienta	< 30 HRc		Poro	Bajo calor de entrada, debido a la baja fricción
Dureza de la herramienta	> 60 HRc		Agujero de gusano	Sobrecalentamiento debido a la fricción

## 2.5.2 Comparación de Tensiones Residuales en Soldadura por Fusión (GMAW) Y FSW de Aluminio

Las tensiones residuales, mejor descritas como campos de tensiones que se encuentra en ausencia de cargas externas, o mejor dicho, son aquellas que no se requieren en una estructura para mantener su equilibrio en el medio. Pueden ser una parte importante de las tensiones totales actuantes en un componente en servicio y presentan una importante influencia sobre las propiedades mecánicas en el componente, la fatiga, fractura frágil como así también sobre la corrosión bajo tensiones [26].

Así que es de suma importancia conocer el nivel de tensiones residuales y su distribución para determinar la vida crítica de un componente, en especial de aquellos que se encuentran soldados [16].

Algunas de las técnicas más utilizadas para la medición de tensiones residuales en soldadura se encuentran la técnica de agujero ciego (ASTM E837-01), difracción de rayos X, técnicas de seccionamiento y otras [16].

Debido a la gran cantidad de variables que afectan la magnitud y la distribución de tensiones residuales resulta primordial el estudio del efecto de los procesos de fabricación de elementos estructurales, así como los parámetros empleados, sobre el nivel de tensiones residuales generadas debido al aporte de térmico que da origen a un campo de tensiones residuales, las cuales podrán alcanzar valores cercanos al límite de fluencia del material a temperatura ambiente [16].

Las tensiones residuales aparecen en dirección longitudinal y transversal al cordón, siendo las primeras en general las de mayor magnitud. En un cordón de soldadura aparecerán zonas con tensiones residuales de tracción y otras con tensiones de compresión. El valor de las tensiones residuales depende principalmente, de la velocidad de enfriamiento, la potencia de la fuente el material base y el de aporte, etc. [16].

Como es bien sabido el proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW) ha revolucionado en los últimos años el campo de la tecnología de la soldadura. Una de las múltiples ventajas mencionadas del proceso es que es de los procesos que presentan el menor nivel de tensiones residuales, debido a que se produce en estado sólido por lo que los gradientes térmicos durante la soldadura son menores [16].

Muchas de las aleaciones de aluminio para fines estructurales generalmente son soldadas mediante el proceso de soldadura por arco eléctrico con alambre macizo y protección gaseosa (GMAW), que involucra la fusión del material a soldar [16].

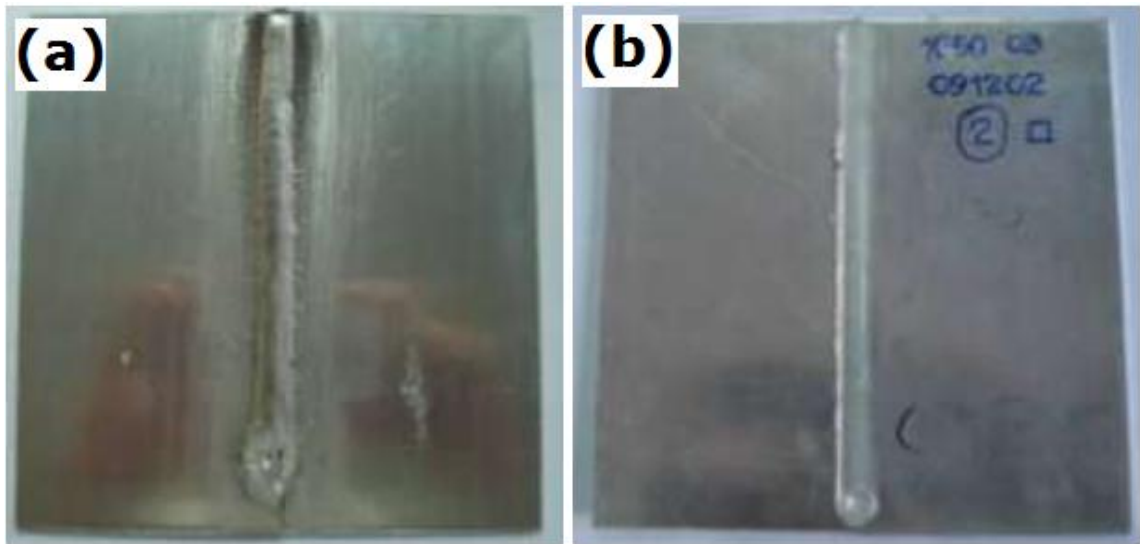
En el artículo analizado se menciona que las tensiones residuales en juntas de aluminio AA1050 y AA5052, soldadas por FSW y por el proceso de soldadura por arco eléctrico GMAW mediante las técnicas de agujero ciego y de seccionamiento, analizando comparativamente ambos procesos [16].

Con el fin de lograr los objetivos propuestos se soldaron probetas de chapa de aluminio AA1050 y de AA5052 de 150mmx70mmx3mm, utilizando los procesos GMAW y FSW. La tabla 2.6 muestra los parámetros de soldadura empleados en cada caso. En la Figura 2.15 se muestran probetas soldadas por ambos procesos [16].

**Tabla 2.7.** Parámetros de los procesos aplicados a las probetas de aluminio AA1050 y de AA5052 [16].

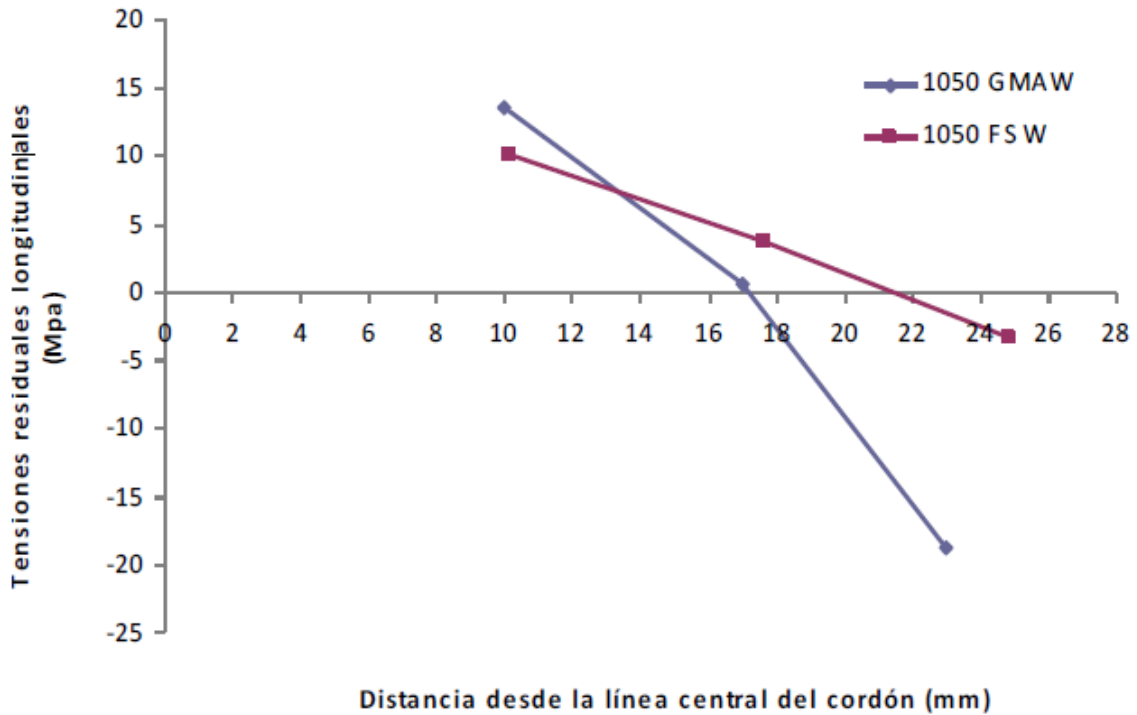
PARAMETROS DE PROCESOS									
GMAW					FSW				
I (A)	V(V)	v (mm/min)	Gas	Dp-p (mm)	V rot (rpm)	v (mm/min)	Ang (°)	Pin	Dh/Dp
130	26	35	Ar	20	514	78	1.5	CUAD	5





**Fig. 2.15.** Probetas soldadas: a- GMAW y b- FSW [16].

En la Figura 2.16 se pueden observar los resultados obtenidos mediante la técnica de seccionamiento de la medición de tensiones residuales longitudinales en función de la distancia a la línea central del cordón, para el AA1050 en ambos procesos de soldadura analizados [16].



**Fig. 2.16.** Tensiones residuales longitudinales en función de la distancia a la LC para AA1050 GMAW y FSW [16].

Los resultados obtenidos por el método del seccionamiento fueron satisfactorios, obteniendo un perfil aproximado del gradiente de tensiones residuales longitudinales, consistentes con lo reportado en la literatura para uniones soldadas similares. Estos valores están por debajo a los estimados mediante la técnica HD para la posición de 20 mm desde la LC [16].

Como es posible ver, la zona cercana al borde del cordón las tensiones residuales en la dirección longitudinal, son de tracción, asociadas a los gradientes térmicos sufridos por el material durante la soldadura. Al separarse de la zona del cordón las mencionadas tensiones de tracción tienden a disminuir, hasta que a una dada distancia se produce la inversión del signo de las mismas pasando a tensiones de compresión debido a que el cuerpo debe encontrarse en equilibrio. Este gradiente de tensiones residuales es habitual en soldadura, siendo de interés la magnitud y la posición de las tensiones máximas de tracción y compresión, así como la ubicación del cambio de signo. La tensión de

tracción máxima medida para GMAW (13.6 MPa) fue alrededor de un 35 % mayor que la determinada para FSW (10 MPa), en posiciones similares [16].

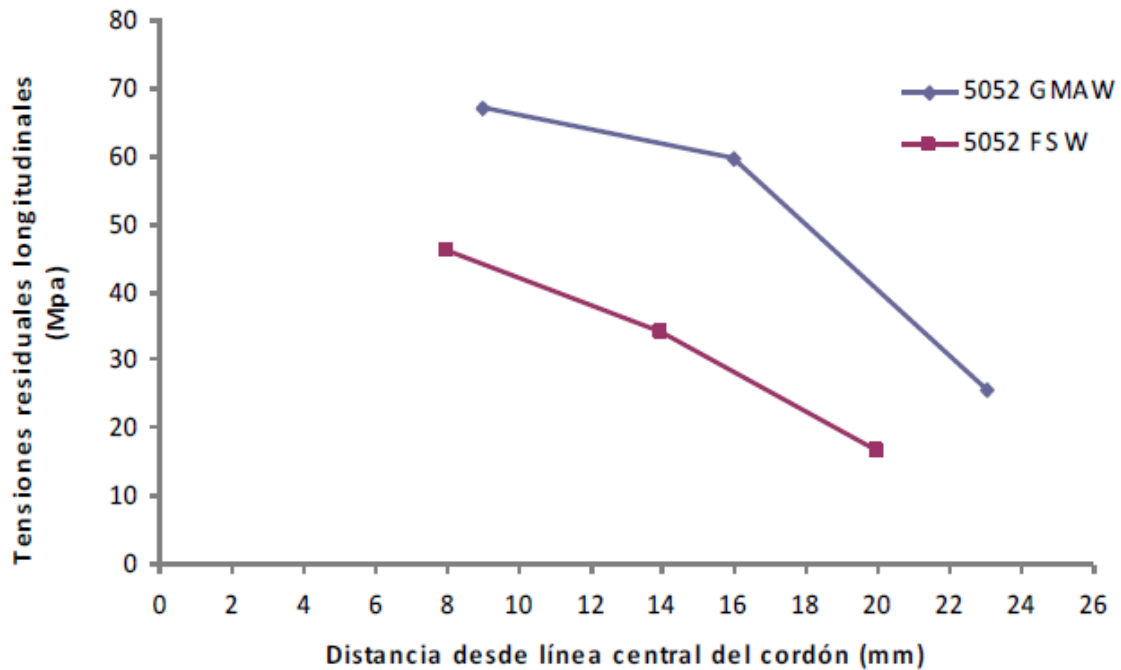
La mínima tensión de compresión medida para GMAW (-18.5 MPa) fue 5 veces mayor a la medida para posiciones similares en FSW.

El cambio de signo se produce a una mayor distancia de la línea central del cordón para FSW (21 mm) que para GMAW (17 mm). El gradiente de tensión para el proceso por fricción fue 0.9 MPa/mm, mientras que para GMAW fue de 2.5 MPa/mm, evidentemente tres veces superior, en el rango de distancias medido [16].

Este mayor gradiente es asociado al mayor gradiente térmico que tiene lugar en el proceso de soldadura por fusión. De este modo la temperatura máxima alcanzada durante el proceso FSW no supera los 450-550°C. Y es posible ver que para el proceso GMAW el valor de las tensiones máximas medidas de tracción y compresión se eleva en el caso del proceso FSW, siendo por lo tanto mayor el gradiente de tensiones y la distancia para el cambio del signo de las tensiones [16].

Las tensiones máximas de tracción y compresión obtenidas longitudinalmente por GMAW fueron un 30% y 370% mayor, respectivamente, que las obtenidas por FSW. Así mismo es posible apreciar que el cambio de signo de las tensiones se produce a los 17 mm del centro de soldadura, mientras que en FSW se encontraba aproximadamente a 20mm, es decir, hay un mayor gradiente de tensiones [16].

La Figura 2.17 muestra los resultados obtenidos mediante la técnica de seccionamiento de la medición de tensiones residuales longitudinales en función de la distancia a la línea central del cordón, para el AA5052 en ambos procesos de soldadura [16].



**Fig. 2.17.** Tensiones residuales longitudinales en función de la distancia a la LC para AA5052 GMAW y FSW [16].

Para este caso los valores de tensiones residuales longitudinales fueron superiores a los determinados para el 1050, no alcanzándose en el rango de distancias medidas el cambio de signo de dichas tensiones. En promedio las tensiones medidas para GMAW fueron un 58% superior a las obtenidas para FSW. Los gradientes de tensiones fueron similares, no obstante el medido para el proceso GMAW (-3,0 MPa/mm) fue superior al del proceso FSW (-2,4MPa/mm). En este sentido ambos fueron superiores a lo determinado para el 1050, particularmente para el proceso FSW [16].

Las tensiones residuales generadas al aplicar el proceso por arco GMAW sobre las probetas de aluminio AA1050 y AA5052 fueron significativamente mayores (30-50%) que las generadas por el proceso de soldadura por FSW, para todas las técnicas de medición empleadas. De la misma forma, se detectaron mayores gradientes de tensiones longitudinales para el proceso

GMAW. Las mediciones realizadas por el método de seccionamiento fueron similares a las obtenidas para posiciones análogas por el método de agujero ciego, aunque estas últimos entregaron valores mayores. Las mediciones obtenidas mediante la técnica de agujero ciego son aproximadas debido a que dichas tensiones no son uniformes en el espesor y que en ciertos casos los valores medidos superaron el 60% del valor de límite de fluencia del material analizado, pudiendo generar errores en exceso en las mediciones [16].

### **2.5.3 Impacto de la Soldadura por Fricción en las Propiedades Mecánicas en Al (CMM)**

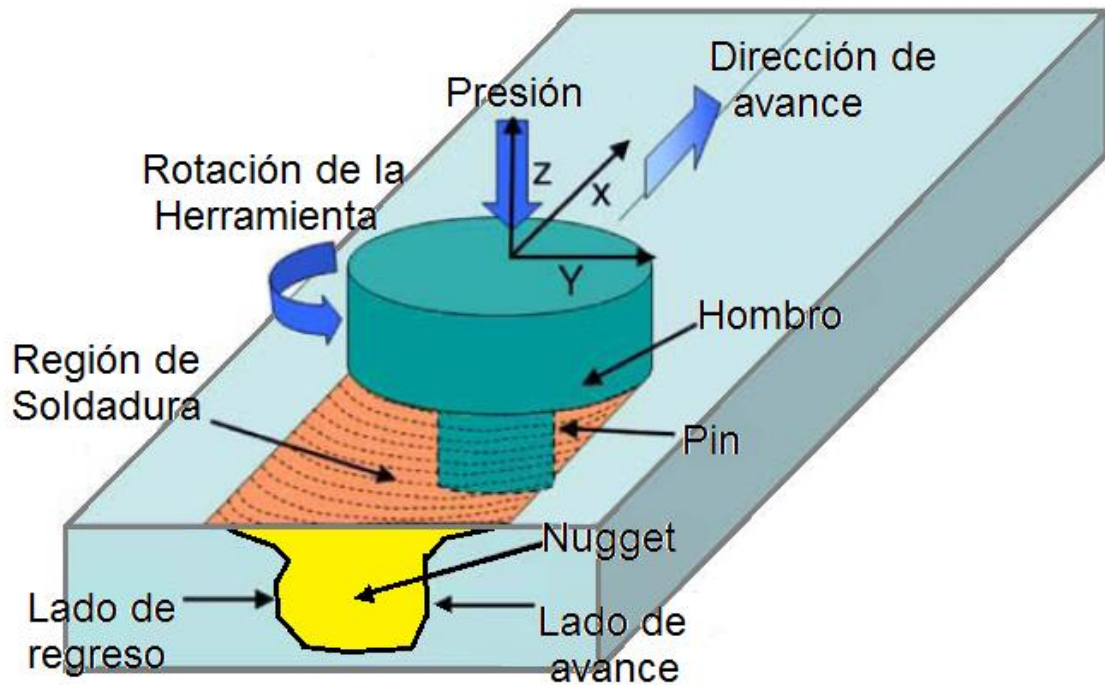
Es evidente la ventaja de este proceso en comparación con los procesos que involucran el uso del arco eléctrico como medio de fusión. Las propiedades mecánicas y la microestructura se ven ampliamente favorecidas cuando se quiere estudiar la zona de coalescencia [16].

#### **2.5.3.1 Impacto de la Soldadura por Fricción en las Propiedades Mecánicas en Al (CMM) Reforzados con SiC**

En el caso un aluminio AA6061 reforzado con partículas de carburo de silicio (SiC), de amplia aplicación aeronáutica se utiliza el método de soldadura por fricción (FSW), dando resultado a un evidente refinamiento de grano y una distribución homogénea de las partículas reforzantes de carburo de silicio [16].

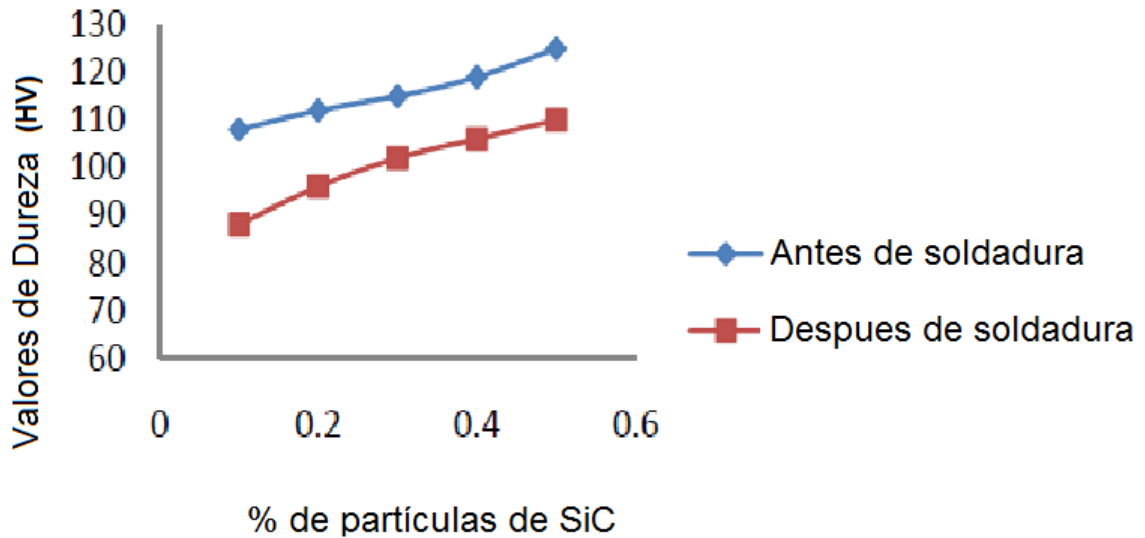
El compuesto con matriz de aluminio AA6061-con porcentajes en peso que varían del 0.1% al 0.5% de nano partículas de SiC se producen mediante fundición dispersando las partículas reforzantes de SiC en el metal fundido por medio de agitación mecánica y ultrasónica. Posteriormente el material es sometido a un tratamiento térmico [16].

La Figura 2.18 muestra esquemáticamente 2 placas de 6mm a tope se utiliza el proceso de soldadura por fricción con los siguientes parámetros: Una herramienta de acero templado, con una rotación de 1200rpm y con un avance de de 0.7mm/sec. Con un hombro de 18 mm de diámetro y un pasador cilíndrico de 4 mm de diámetro [16].



**Fig. 2.18.** Representación esquemática del proceso de soldadura por fricción en 2 placas de aluminio [16].

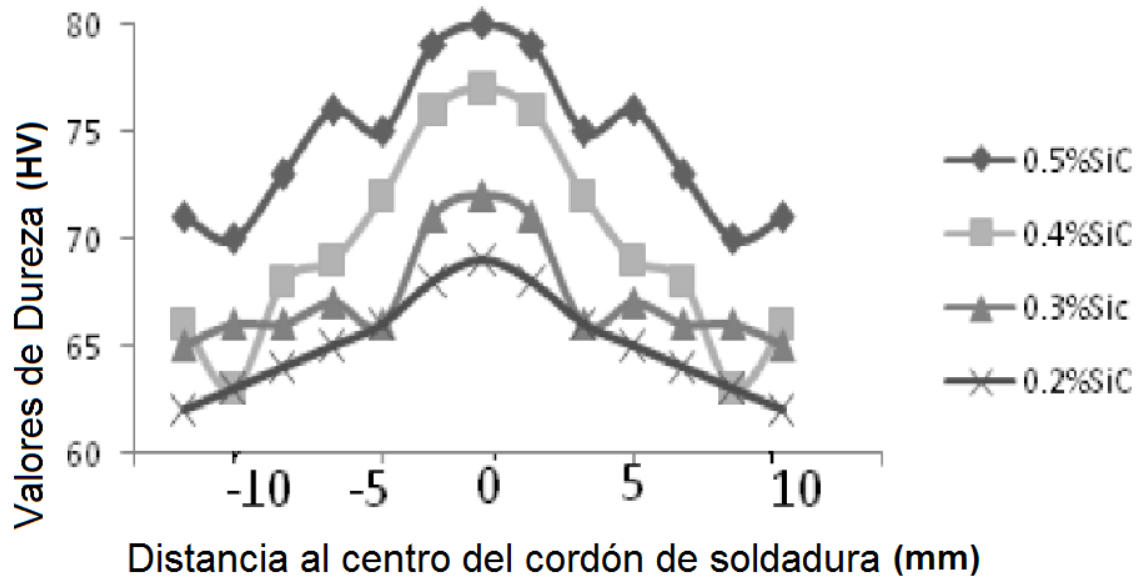
Los valores de dureza se miden a lo largo de la línea de soldadura en la dirección transversal con un durómetro Vickers. Los valores de dureza del material antes y después del proceso se ilustran en la Figura 2.19.



**Fig. 2.19.** Comparación de durezas [16].

La dureza del material depende en gran medida de la distribución y porcentaje de partículas reforzantes, así como de la distribución del precipitado generado por un tratamiento posterior a la soldadura como resultado de la disolución parcial de los precipitados gruesos y precipitación posteriores durante el envejecimiento natural después del proceso de soldado. La probeta de aleación de aluminio se compone de tres zonas: la zona del botón (NZ), Zona afectada termo mecánicamente (TMAZ) y la zona afectada por el calor [9].

Los valores de dureza en la región soldada son menores en el metal base como se aprecia en la Figura 2.20, todo esto relacionado al efecto del calentamiento por fricción en la matriz de aluminio y el porcentaje de partículas reforzantes. La dureza aumenta en la zona de agitación, esto en consecuencia al calor generado por la fricción de la herramienta.



**Fig. 2.20.** Dureza al los extremos del cordón de soldadura en función del porcentaje de partículas reforzantes [16].

Los ensayos de tracción ilustran el comportamiento a la tracción del material compuesto de diferentes porcentajes en peso de nano partículas de carburo de silicio y las condiciones de calor generado por la fricción. Los ensayos de tensión demuestran que la adición de partículas reforzantes a la matriz de aleación de aluminio, aumenta la resistencia a la tensión incrementando su índice de elongación antes de la ruptura cómo es posible apreciar en la Tabla 2.8 y 2.9 [22].



**Tabla 2.8.** Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio utilizadas como matriz metálica en compuestos de matriz metálica (CMM) [16].

<b>% En Peso de Partículas de SiC</b>	<b>Resistencia a la Cedencia (Mpa)</b>	<b>Resistencia a la Tensión (Mpa)</b>	<b>Elongación</b>
0.1	320	336	39
0.2	335	355	35
0.3	360	390	30
0.4	386	425	28
0.5	402	452	24

**Tabla 2.9.** Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio utilizadas como matriz metálica en compuestos de matriz metálica (CMM) post soldadura [16].

<b>% En Peso de Partículas de SiC</b>	<b>Resistencia a la Cedencia (Mpa)</b>	<b>Resistencia a la Tensión (Mpa)</b>	<b>Elongación</b>
0.1	252	267	35
0.2	265	280	26
0.3	273	298	21
0.4	285	308	18
0.5	290	330	15

El aumento de la elongación podría estar relacionado con el efecto del tratamiento térmico post soldadura en la aleación de aluminio debido al engrosamiento de la matriz y de los precipitados intermetálicos. Cabe mencionar que la junta a tope ejerce un efecto sobre el comportamiento ante la resistencia la tensión ya que La ductilidad en la zona de soldadura se redujo significativamente [23].

#### **2.5.4 Evolución Microestructural en Al (CMM) Aplicando FSW**

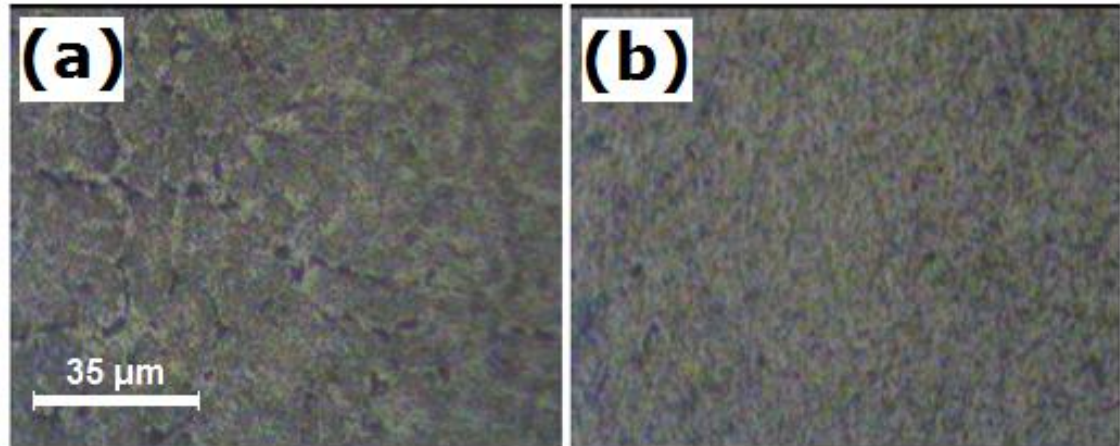
El refinamiento de los precipitados y el tamaño de grano, se ven afectados por el porcentaje de de nano partículas. Los diferentes tamaños de grano en la microestructura varían en función de los porcentajes de nano partículas.

El tamaño de grano es más grueso en la zona del botón con precipitado. Así, esta zona soldada suele ser la más débil. Los granos equiaxiales se observan en el cordón de soldadura, esto implica que la recristalización dinámica da lugar durante la soldadura por fricción debido a la deformación plástica. Las estructuras de grano que rodean la herramienta durante el proceso desarrollan gradualmente distorsiones en la red a medida que se acercan a la herramienta, al final se obtiene una estructura de de granos refinados [24].

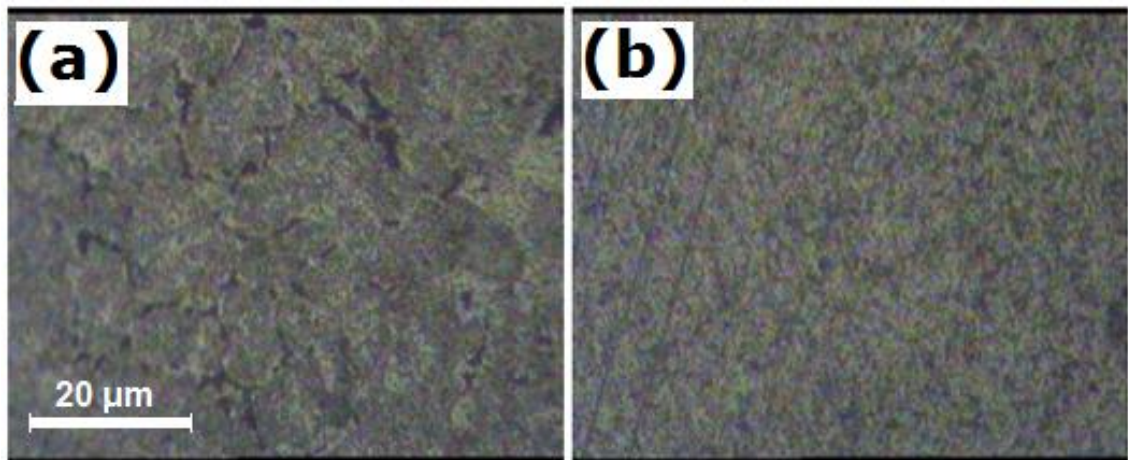
##### **2.5.4.1 Evolución Microestructural en Al (CMM) Reforzados con SiC**

Las partículas de SiC generan más sitios de nucleación para el nuevo recristalizado aumentando la deformación local en la matriz y causando distorsiones de red. La Figura 2.21 (a) y 2.22 (b) muestran las imágenes de los límites de grano en los CMM después de un proceso de soldadura por fricción. Los granos más grandes se observan en Los CMM sin soldar, y los granos más

pequeños se ven en el material después de haber sido aplicado el proceso de soldadura por fricción [16].

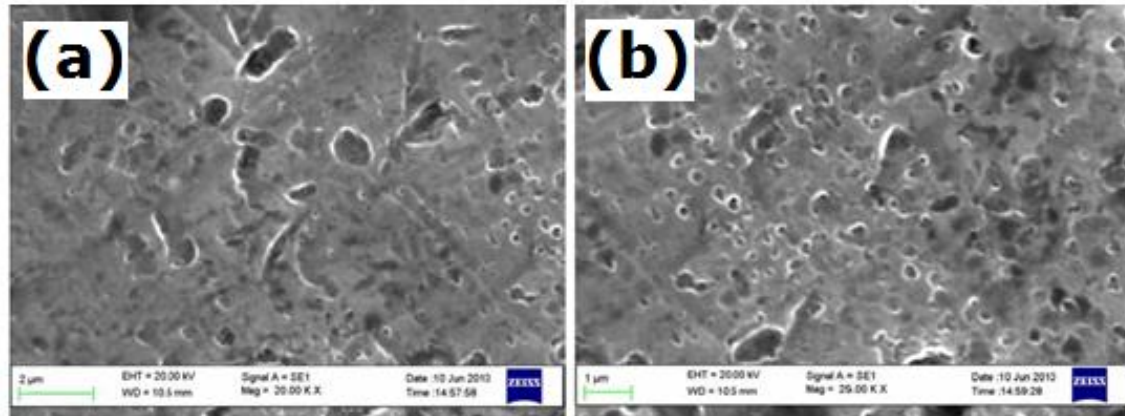


**Fig. 2.21.** Micrografía de un CMM (a), micrografía de un CMM post soldadura (b) [16].



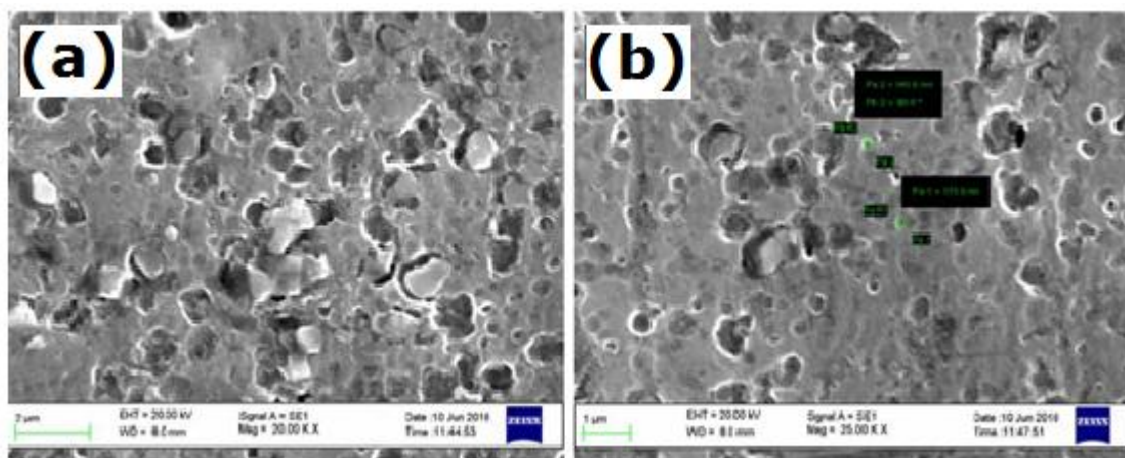
**Fig. 2.22.** Micrografía de un CMM (a), micrografía de un CMM post soldadura (b) [16].

Los granos finos equiaxiales observados en la zona del botón soldadura son más pequeños (Fig.2.23) que los de los CMM's sin soldar. Esto indica que la recristalización dinámica se lleva a cabo en la zona del botón de soldadura. Del mismo modo que cualquier otro proceso de recristalización producto de la nucleación.



**Fig. 2.23.** Micrografía de un CMM con 0.4% de SiC a 20000X (a), y a 25000X (b) [16].

Las partículas juegan un papel importante en el control del tamaño de grano recristalizado estimulado por la partícula nucleación (Fig. 2.24).



**Fig. 2.24.** Micrografía de un CMM con 0.5% de SiC a 20000X (a), y a 25000X (b) [16].

La soldadura por fricción puede ser considerada como un proceso de trabajo en caliente en el que se imparte la deformación plástica severa a la pieza de trabajo a través de la rotación mediante el hombro y el pin [16].

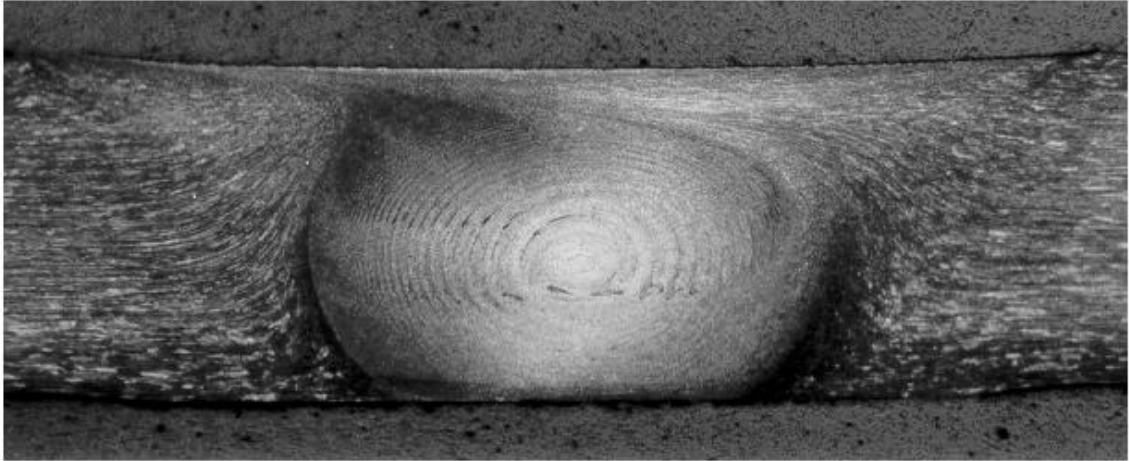
#### **2.5.4.2 Evolución Microestructural en Al (CMM) reforzados con $\text{Al}_2\text{O}_3$**

A continuación se muestra el impacto del proceso de soldadura (FSW) en la microestructura y dureza de los materiales compuestos de aluminio reforzado con partículas de alúmina, en este caso los W6A20A y W7A10A compuestos por (AA6061 reforzada con 20% de Vol.de partículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y (AA7005 reforzada con 10% de Vol.de partículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) respectivamente [28].

El efecto de la severa deformación plástica y el calentamiento por fricción durante el proceso así como los efectos de las partículas reforzantes y el aluminio utilizado como matriz [28].

Es posible apreciar una reducción significativa en tamaño de las partículas reforzantes y su mejor distribución en la zona de soldadura, así como un refinamiento del grano debido a la recristalización dinámica [28].

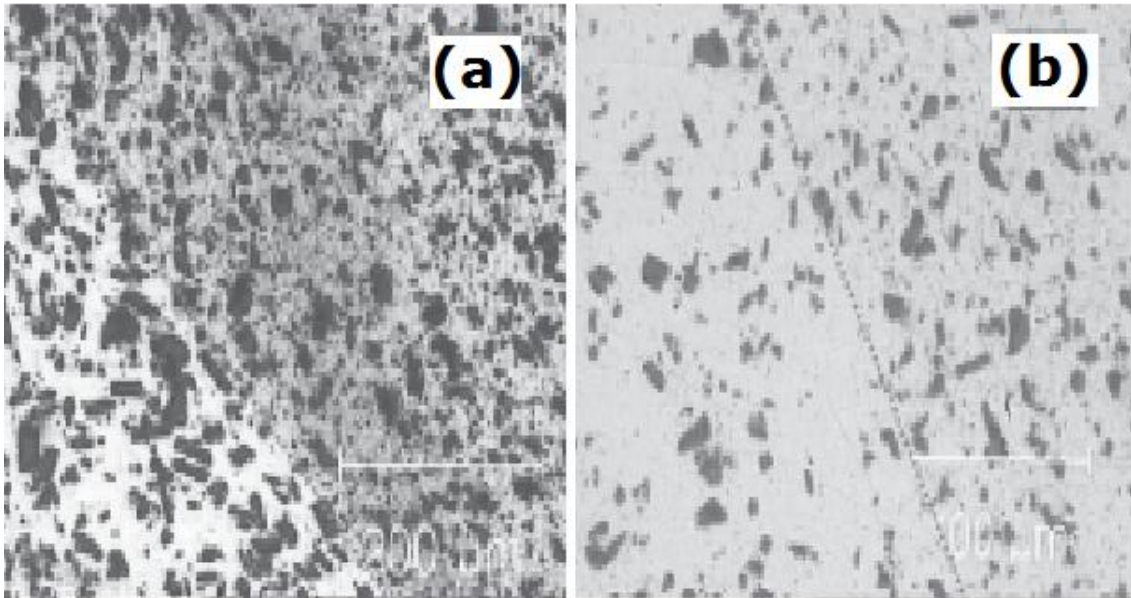
La Figura 2.26 muestra una baja magnificación óptica de la imagen de la zona de soldadura, mostrando el "Anillo de cebolla" estructura característica de este proceso de soldadura [28].



**Fig. 2.25.** Detalle del anillo de cebolla en de las secciones transversales del compuesto soldado mediante FSW (W6A20A) [28].

Es posible apreciar que no existe ninguno de los defectos típicos que generalmente se observan en la zona de soldadura con los procesos convencionales de fusión, tales como la porosidad o la segregación de refuerzo [28].

Las micrografías ópticas muestran la transición del material (a) a la pepita (b) se muestran en la Figura 2.27 para el W6A20A y W7A10A, respectivamente. En ambos materiales, se aprecia una distribución diferente de las partículas y una reducción en su tamaño, debido a la acción abrasiva de la herramienta [28].



**Fig. 2.26.** Las micrografías ópticas muestran la transición del material (a) a la pepita (b) para el W6A20A y W7A10A, respectivamente. En ambos materiales, se aprecia una distribución diferente de las partículas y una reducción en su tamaño, debido a la acción abrasiva de la herramienta [28].

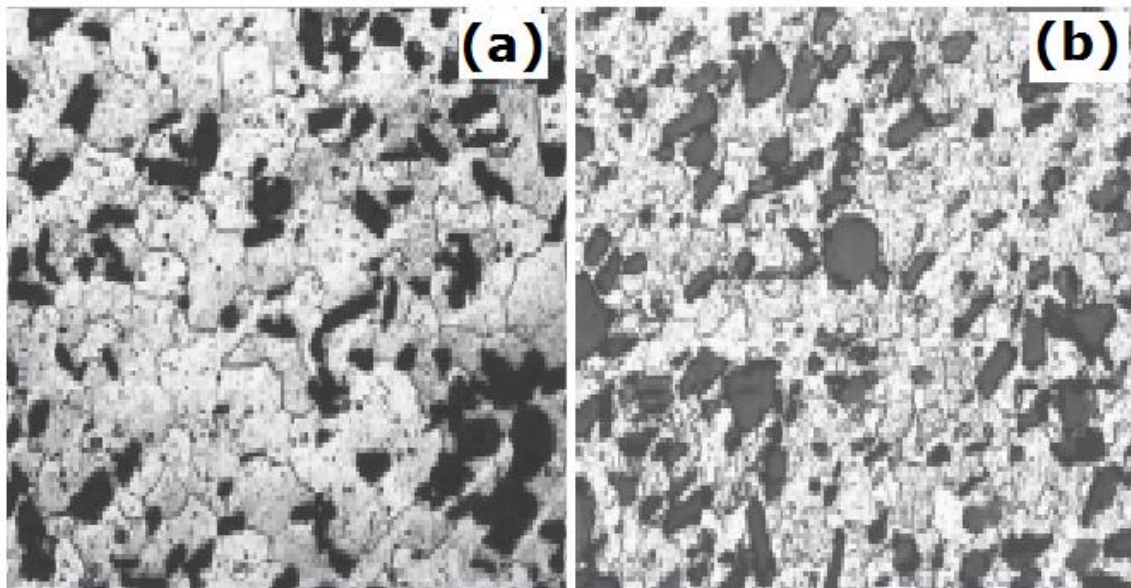
La fragmentación de las partículas de alúmina, debido al proceso FSW, se confirma con el análisis de las micrografías ópticas del material soldado. El refinamiento de las partículas fue mayor para el W6A20A, que se caracteriza por el refuerzo inicial más grande partículas (área de partícula promedio =  $135 \mu\text{m}^2$ ), respecto a los de la W7A10A (Área de partícula promedio =  $44 \mu\text{m}^2$ ) [28].

El área de partículas, en el W6A20A, se ve una disminución de alrededor del 60% y 40%, en las zonas cercanas al hombro, respectivamente, probablemente debido a diferentes tensiones inducidas por la herramienta y el área de mayor contacto entre la herramienta y el material, debido a la geometría de la herramienta [28].

Varios autores informan de que el proceso FSW también conduce a la recristalización dinámica de aleaciones de aluminio, debido a la deformación plástica severa produciendo un gran calentamiento debido a la fricción [28].



Es posible observar que en la zona de pepita de los dos materiales soldados y comparando las microestructuras de los materiales (Fig. 2.28). El tamaño medio de grano de la matriz, en el W6A20A, se nota una disminución de alrededor de 29 micras en el material a 20 micras en la zona de soldadura. Un refinamiento de grano superior se observa en el W7A10A, que mostró una disminución del tamaño de grano de la matriz de 29 a 12 micras en la zona de pepita [28].



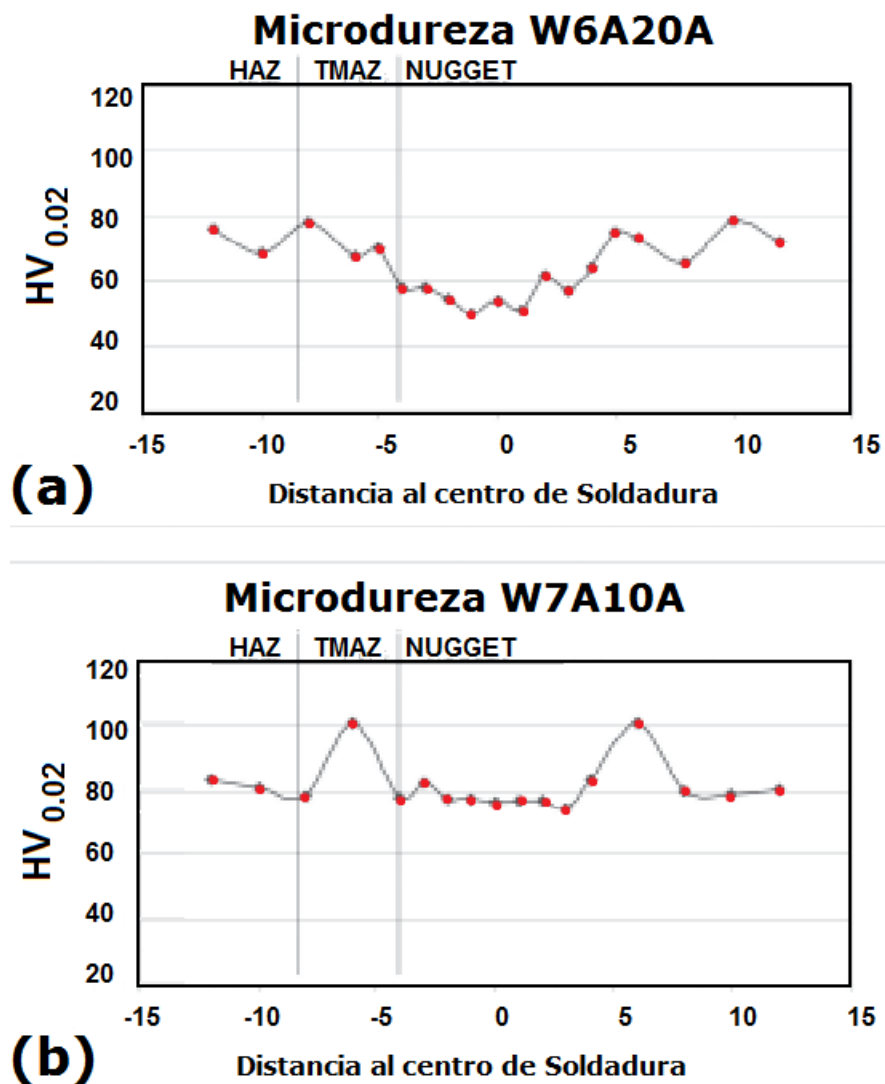
**Fig. 2.27.** Efecto del proceso FSW en el tamaño de grano, para el W6A20A: material base (a) y pepita (b) [28].

Es bien sabido que una distribución homogénea de las partículas de refuerzo es indispensable para lograr buenas propiedades mecánicas. Por lo tanto, es importante que el proceso de soldadura no dé lugar a agrupamiento de partículas o zonas en donde escaseen las partículas reforzantes [28].



### 2.5.4.3 Mediciones de Microdureza

Con el fin de investigar los efectos inducidos por el proceso de FSW en los compuestos de matriz de aluminio, se realizaron mediciones de micro dureza con una carga muy baja (HV0.02), en la zona de pepita, así como en las secciones transversales de las placas soldadas. Los resultados se muestran en las graficas de la Figura 2.29 (a) para el W6A20A, y la Figura 2.29 (b) para el W7A10A [28].



**Fig. 2.28.** Perfiles de microdureza en la sección transversal con soldadura por fricción de los compuestos W6A20A (a) y W7A10A (b) [28].

En el perfil de micro dureza de la muestra del material W6A20A es notoria una disminución las mencionadas propiedades alrededor de 80 HV0.02 hasta un 50 HV0.02 en la línea media de la zona soldadura. Esta disminución en la micro dureza del aluminio, incluso con una reducción en su tamaño de grano, también observado en FSW reforzada AA6061 y debe ser probablemente relacionado con engrosamiento o disolución parcial de los compuestos intermetálicos, inducida por la deformación plástica severa [28].

E perfil de micro dureza para el W7A10A, en la figura 2.27 (b), muestra un valor mínimo de alrededor de 77 HV0.02 en la línea media de la zona de pepita, un valor máximo de alrededor de 100 HV0.02 en zona termo mecánicamente afectada (TMAZ) y un mínimo de alrededor de 75 HV0.02 en la zona afectada térmicamente (HAZ), así que la micro dureza aumento hasta 84 HV0.02 en el material [28].

Esta tendencia se relaciona también con los cambios micro estructurales inducidos por el proceso de soldadura por fricción en la matriz. En particular, el máximo observado en la TMAZ se debe probablemente debido a los efectos de endurecimiento por deformación y re-precipitación de la transición de fases, la micro dureza baja en la pepita debe estar relacionada con el engrosamiento y / o disolución de los precipitados y, finalmente, el mínimo de micro dureza en la HAZ puede ser causada por engrosamiento de los precipitados debido a el calentamiento por la fricción [28].

Se ha demostrado que la ductilidad del aluminio reforzado se reduce por la presencia de partículas de gran tamaño, por otro lado las partículas pequeñas tienen poco efecto sobre la ductilidad. La agrupación de partículas en la matriz también puede disminuir la ductilidad [28].

También el efecto de la forma de las partículas en las propiedades de fractura del AA6061 y se encontró que, la concentración de estrés en la matriz

aumenta alrededor de partículas angulares, por lo tanto la ductilidad del material compuesto se reducirá debido a la severa deformación plástica en las esquinas de las partículas [28].

Por tanto del efecto del proceso FSW en la microestructura y propiedades mecánicas de materiales compuestos (W6A20A y W7A10A) podemos decir que una reducción significativa en el tamaño de las partículas de refuerzo (mayor en el W6A20A, debido al mayor tamaño de las partículas en el material) y una distribución homogénea de las partículas en la zona de soldadura, así como un grano sustancial que se observa en la zona de pepita debido a la dinámica de recristalización inducida por la severa la deformación y el calentamiento por fricción, simultáneas durante la soldadura [28].

Los perfiles de micro dureza se relacionan con los cambios micro estructurales inducidos por el proceso, las diferencias entre los dos compuestos se debe a que el tamaño de grano de la matriz, inducida por la recristalización dinámica en la pepita, y las diferentes modificaciones de los compuestos intermetálico [28].

# **CAPÍTULO 3**

## **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA**

### **3.1 Proceso de Soldadura por Fricción (FSW) Aplicado a Compuestos de Matriz Metálica**

Es evidente la ventaja de este proceso en comparación con los procesos que involucran el uso del arco eléctrico como medio de fusión. Las propiedades mecánicas y la microestructura se ven ampliamente favorecidas cuando se quiere estudiar la zona de coalescencia.

El proceso de soldadura por fricción resulta tener ventajas comparativas respecto a otros procesos, por lo que se han ejecutado exitosas y numerosas aplicaciones industriales en la industria aeronáutica, aeroespacial, automotriz, ferroviaria y naval, por lo tanto el estudio y su aplicación a diversas configuraciones y materiales es de gran interés.

Estudios recientes demuestran que los procesos en estado sólido pueden ser utilizados con éxito en la unión de una gran variedad de materiales compuestos. Las principales ventajas de los procesos de soldadura en estado

sólido frente a los de fusión se resumen en que: no se forman fases fundidas que por lo tanto forman fases frágiles, y así se evitan los problemas de viscosidad y segregación de partículas.

A pesar de que los compuestos de matriz metálica (CMM) son bien conocidos, es escaso el número de publicaciones acerca de las tecnologías de unión aplicadas a estos materiales. De ahí la relevancia en cuanto al estudio, diseño y aplicación, de componentes de dicho material sin utilizar procesos de soldadura que deterioren sus propiedades mecánicas, no obstante debido al alto costo en cuanto a las investigaciones científicas muchas de las cuales son de carácter militar, se evita la difusión de los resultados obtenidos al aplicar los procesos de soldadura en los compuestos de matriz metálica (CMM).

### **3.2 Soldabilidad y Aspectos Metalúrgicos del Proceso de Unión en Estado Sólido Mediante FSW de los (CMM)**

Debido a las características mecánicas y químicas de los compuestos de matriz metálica, deben ser seleccionados con sumo cuidado los procesos de unión aplicados a estos ya que se debe tomar en cuenta que los procesos de soldadura por fusión funden el material y lo degeneran, deteriorando o en su defecto destruyendo el efecto de los elementos de reforzantes. Por lo tanto, los procesos de soldadura por fusión resultan poco adecuados para la unión de este tipo de materiales, todo esto gracias a que a altas temperaturas las partículas de refuerzo y el aluminio líquido reaccionan entre si creando fases perjudiciales que modifican de manera negativa la microestructura del material, lo que resulta perjudicial para las propiedades mecánicas de las uniones de los AI (CMM).

### **3.3 Impacto de las Variables del Proceso FSW en las Características Microestructurales y Mecánicas de de los (CMM)**

Los compuestos de matriz de aluminio son una clase de materiales que poseen propiedades que los hacen atractivos para una gran variedad de aplicaciones donde se requiere de resistencia al desgaste, resistencia mecánica, estabilidad química, así como de estabilidad dimensional a temperaturas relativamente elevadas. Debido a las propiedades anteriormente mencionadas, es importante tomar en cuenta que las tensiones residuales generadas al aplicar el proceso por arco son significativamente mayores que las generadas por el proceso de soldadura por FSW, para todas las técnicas de medición empleadas. De la misma forma, son evidentes los mayores gradientes de tensiones longitudinales para los procesos por arco.

El tamaño de grano es más grueso en la zona del botón con precipitado. Así, esta zona soldada suele ser la más débil. Los granos equiaxiales presentes en el cordón de soldadura, se ven afectados directamente por la recristalización dinámica la cual tiene lugar durante la soldadura por fricción debido a la deformación plástica. Las estructuras de grano que rodean la herramienta durante el proceso desarrollan gradualmente distorsiones en la red a medida que se acercan a la herramienta, al final se obtiene una estructura de granos refinados.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a lo estudiado en el estado del arte, el proceso de soldadura por fricción resulta tener ventajas comparativas respecto a los procesos de soldadura que involucran el uso del arco eléctrico como medio de fusión, solo por mencionar algunas ventajas encontramos que la zona de coalescencia se ve ampliamente favorecida al aplicar el proceso ya que no se degenera el material haciendo que conserve o mejor aun mejorando las propiedades mecánicas del material así como su microestructura, esto debido al refinamiento de grano, de ahí las numerosas aplicaciones y exitosas aplicaciones en la industria automotriz, ferroviaria, naval, solo por citar algunas, por eso es que es tan importante el estudio de este proceso así como este tipo de materiales para su perfeccionamiento y mejora

Al obtener información fundamental del proceso de soldadura por fricción así como de los compuestos de matriz metálica, se puede estudiar el impacto de las variables del proceso al aplicarlo en un material compuesto, que al tratarse de proceso de unión en estado sólido se obtiene como resultado que la ductilidad del material compuesto se reduce debido a que la severa deformación plástica y a la disminución en el tamaño de grano así como una distribución homogénea de las partículas reforzantes, además de decir que al no tratarse de un proceso por fusión no se generan fases fundidas por lo tanto no se generan fases frías que en determinadas circunstancias puedan alterar la homogeneidad en las propiedades del material

Hablando de la soldabilidad de los materiales compuestos de matriz de aluminio podemos decir que debido a las características mecánicas y químicas dichos compuestos, los procesos de unión aplicables a estos deben ser seleccionados cuidadosamente ya que se debe tomar en cuenta que los procesos de soldadura por fusión funden el material y lo degeneran, deteriorando o en su defecto destruyendo el efecto de los elementos de reforzantes. Por lo tanto, los procesos de soldadura por fusión resultan poco adecuados para la unión de este tipo de materiales, todo esto gracias a que a altas temperaturas las partículas de refuerzo y el aluminio líquido reaccionan entre sí, creando fases perjudiciales que modifican de manera negativa la microestructura del material.

Las tensiones residuales generadas al aplicar el proceso por arco son significativamente mayores que las generadas por el proceso de soldadura por FSW, para todas las técnicas de medición empleadas. De la misma forma, son evidentes los mayores gradientes de tensiones longitudinales para los procesos por arco, las estructuras de grano que rodean la herramienta durante el proceso desarrollan gradualmente distorsiones en la red a medida que se acercan a la herramienta, al final se obtiene una estructura de granos refinados mejorando notablemente las características mecánicas del material y en su defecto de la unión.



# LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS

## FIGURAS

1. **Fig. 2.1.** Pistón para motor diesel hecho de aluminio reforzado con fibras cortas de  $Al_2O_3$ .
2. **Fig. 2.2.** Disco para freno hecho de aluminio y partículas reforzantes.
3. **Fig. 2.3.** Esquema de tipos de reforzamiento de los compuestos de matriz metálica (CMM).
4. **Fig. 2.4.** Esquema de los principales procesos para producción de compuestos de matriz metálica.
5. **Fig. 2.5.** Micrografía del material A6061/ $Al_2O_3$ /22p
6. **Fig. 2.6.** Curvas tensión-deformación ingenieril para la aleación A6061 O, A6061 T4 y A6061 T6.
7. **Fig. 2.7.** Proceso de soldadura por fricción FSW.
8. **Fig. 2.8.** Acción de la herramienta sobre la junta, nótese la agitación del material en el área soldada.
9. **Fig. 2.9.** Herramienta utilizada para el proceso FSW, se muestra el hombro y el pin en 2 tipos de herramientas diferentes.
10. **Fig. 2.10.** Esquema representativo de la acción del pin y del hombro que también proporciona aislamiento para el volumen de material que fluye durante el proceso.
11. **Fig. 2.11.** Secuencia de la acción de la herramienta y sus componentes durante el proceso de soldadura.
12. **Fig. 2.12.** Cuerpo, hombro de la herramienta, y soportes sujetadores.

13. **Fig. 2.13.** Diferencia a la hora de soldar con el control de parámetros (a) y con el control de la posición. Mientras que en la figura (b) los parámetros de soldadura: la velocidad de 2 m / min, velocidad de rotación de la herramienta 1800 rpm, fuerza vertical hacia abajo en el lado izquierdo de 800 kg. Ambas muestras fueron soldadas con la misma máquina.
14. **Fig. 2.14.** Flujo del material plastificado por acción de la fricción en diferentes planos horizontales (a) 0,35 mm, (b) 1,59 mm y (c) 2,28 mm por debajo de la superficie superior de una placa de acero inoxidable 304 de 3,18 mm de espesor. Velocidad de soldadura de 4 mm s<sup>-1</sup> con rotación de la herramienta a 300 rpm.
15. **Fig. 2.15.** Probetas soldadas: a- GMAW y b- FSW.
16. **Fig. 2.16.** Tensiones residuales longitudinales en función de la distancia a la LC para AA1050 GMAW y FSW.
17. **Fig. 2.17.** Tensiones residuales longitudinales en función de la distancia a la LC para AA5052 GMAW y FSW.
18. **Fig. 2.18.** Representación esquemática del proceso de soldadura por fricción en 2 placas de aluminio.
19. **Fig. 2.19.** Comparación de durezas.
20. **Fig. 2.20.** Dureza al los extremos del cordón de soldadura en función del porcentaje de partículas reforzantes.
21. **Fig. 2.21.** Micrografía de un CMM (a), micrografía de un CMM post soldadura (b).
22. **Fig. 2.22.** Micrografía de un CMM (a), micrografía de un CMM post soldadura (b).
23. **Figura 2.23.** Micrografía de un CMM con 0.4% de SiC.
24. **Figura 2.24.** Micrografía de un CMM con 0.5% de SiC.
25. **Fig. 2.25.** Detalle del anillo de cebolla en de las secciones transversales del compuesto soldado mediante FSW (W6A20A).
26. **Fig. 2.26.** Las micrografías ópticas muestran la transición del material (a) a la pepita (b) para el W6A20A y W7A10A, respectivamente. En ambos

materiales, se aprecia una distribución diferente de las partículas y una reducción en su tamaño, debido a la acción abrasiva de la herramienta.

27. **Fig. 2.27.** Efecto del proceso FSW en el tamaño de grano, para el W6A20A: material base (a) y pepita (b).

28. **Fig. 2.28.** Perfiles de microdureza en la sección transversal con soldadura por fricción de los compuestos W6A20A (a) y W7A10A (b).

## TABLAS

1. **Tabla 2.1.** Ejemplos de algunos elementos de reforzamiento utilizados en materiales compuestos de matriz metálica (CMM).
2. **Tabla 2.2** Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio utilizadas como matriz metálica en compuestos de matriz metálica (CMM).
3. **Tabla 2.3.** Propiedades mecánicas de los materiales A6061 y A6061MMC en los diferentes estados metalúrgicos
4. **Tabla 2.4.** Procesos de soldadura utilizados en los compuestos de matriz de aluminio.
5. **Tabla 2.5.** Principales parámetros y efectos del proceso FSW.
6. **Tabla 2.6.** Defectos comunes en la soldadura FSW aplicada a CMM.
7. **Tabla 2.7.** Parámetros de los procesos aplicados a las probetas de aluminio AA1050 y de AA5052.
8. **Tabla 2.8** Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio utilizadas como matriz metálica en compuestos de matriz metálica (CMM).
9. **Tabla 2.9** Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio utilizadas como matriz metálica en compuestos de matriz metálica (CMM) post soldadura.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1- A. Mortensen y S. Suresh, *Inter. Mater. Reviews* 40 (1995) 239.
- 2- W.F. Smith, *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales* (McGraw-Hill, España, 1998).
- 3- J.R. Davis, *Aluminium and Aluminium Alloys ASM Specialty Handbook* (1998).
- 4- D.J. Lloyd, *Int. Mater. Rev.* 39 (1994) 1.
- 5- J.M. Ureña, Gómez de Salazar, L. Gil, P. Rodrigo y E.E. Martínez, *Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio* 39 (2000) 243.
- 6- N. Chawla, C. Andres, J.W. Jones y J.E. Allison, *Metall. Mater. Trans. A* 29 (1998) 2843.
- 7- Y. Kajikawa, T. Nukami y M.C. Flemings, *Metall. Mater. Trans. A* 26 (1995) 2155.
- 8- R.L. Williamson, J.T. Drake y R.H. Rabin, Ed. Kamleshwar Upadhyay, *The Minerals, Metal and Materials Society* (1991) p. 241.
- 9- Chawla KK, Chawla N. 2006 *METAL MATRIX COMPOSITES* Springer Science+Business Media, Inc
- 10- Kainer KU. 2006. *Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- 11- American Society for Metals. 2001 *Metals Handbook: composites*. ASM International (21)
- 12- Mortensen A, SanMarchi C, Degischer HP. 2000. *Glossary of Terms specific to Metal Matrix Composites*. MMC-Assess Publications. (1):1-13

- 13-AIMEN. 2007. Revisión de procesos de soldadura para materiales compuestos de matriz de aluminio. Asociación de Investigación Metalúrgica del Noreste (AIMEN). 1-9.
- 14-Cabot P, Moglioni A, Carella E. 2003. Soldadura Por Friccion Agitacion (FSW) De AA 6061 T6. Matéria, 8 (2): 187- 195
- 15-American Welding Society. 1996. Manual de Soldadura: soldadura Por Fricción. AWS. 8va ed. Tomo II. Cap. 23. 740-760
- 16-NANDIPATI G, NAGESWARA RD, RAMANAIAH N. 2010. Effect of Microstructural changes on Mechanical properties of Friction stir welded Nano SiC reinforced AA6061 composite 2(11): 6490-6499
- 17-W.M.Thomas, E.D.Nicholas. 2007.Friction stir welding for the Transportation industries, Materials and Design vol.18 , , pp 269-273.
- 18-M.Peel, A.Steuwer,M.Preuss,P.J.Withers, Microstructure,Mechanical properties & residual stresses as a function of welding speed in Aluminum AA5083 friction stir welds, Acta Materilia,vol.51, 2003,pp 4791-4801.
- 19-P.Staron, M.Kocak, S.W.Williams, A.Wescott, Residual stresses in friction stir welded Al.sheets Phys.B:Condens.Matter vol.350, 2004, ppE491-E493.
- 20-G.Pouget, A.P. Reynolds, Residual stress and microstructure effects on fatigue crack growth in AA2050 friction stir welds, International journal of fatigue,vol.30, 2008,pp463-472.
- 21-K.V.Jata,S.L.Semiatin, ,Continuous Dynamic recrystallisation during friction stir welding of high strength aluminum alloys, Scriptamater.vol.43, 2000, pp743-749
- 22-L. Ceschini, I.Boromei, G.Minak,A.Morri,F.Tarterini, Microstructure,tensile and fatigue properties of AA6061/20 vol.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p friction stirwelded joints, Composites: Part A 38, 2007, pp1200-1210.
- 23-Colligan K. Material flow behavior during Friction stir welding of Aluminum, Weld Journal, 1999, pp229s-237s.

- 24-R.W.Fonda, J.F.Bingert,K.J.Colligan, Development of grain structure during friction stir welding,Scripta Materilia.vol.51, 2004, pp243-248.
- 25-ESAB. 2003. Friction Stir Welding “The ESAB way”. ESAB Co.
- 26-Melendo JC, Burgueño A, Tufaro L, Svoboda HG. 2010. Evaluación de Tensiones Residuales en Soldadura de Aluminio por FSW y GTAW. IBEROMET IX.
- 27-Centro de Investigación, Desarrollo, Innovación y Diseño en Ingeniería. 2009. Innovación en Soldadura: Proceso de Soldadura Fricción por Agitación (FSW). Universidad de Buenos Aires.
- 28-Boromei L, Ceschini L, Morri A. Garagnani GL. 2005. FRICTION STIR WELDING OF ALUMINIUM BASED COMPOSITES REINFORCED WITH Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PARTICLES: EFFECTS ON MICROSTRUCTURE AND CHARPY IMPACT ENERGY. Metallurgical Science and Technology. 12 – 21.
- 29-Fernandéz GJ. 2004. Tesis: “CHARACTERIZATION OF TOOL WEAR AND WELD OPTIMIZATION IN THE FRICTION-STIR WELDING OF CAST ALUMINUM 359 + 20 % SiC METAL-MATRIX COMPOSITE”. University of Texas at El Paso.
- 30-Mishra RS, Ma ZY. 2005. Friction Stir Welding and Processing. Materials Science and Engineering. (50): 1 – 78.
- 31-Nandan R, DebRoy T, Bhadeshia HK. 2008. Recent Advances in Friction Stir Welding Process, Weldment Structure and Properties. Progress in Materials Science. (53): 980 – 1023.
- 32-Rajakumar S, Muralidharan C. Balasubramanian V. 2011. Statistical analysis to predict grain size and hardness of the weld nugget of friction-stir-welded AA6061-T6 aluminium alloy joints. Springer-Verlag London.
- 33- Forn A, Martín E, Rupérez E, Baile M. 2005. FLUJO PLÁSTICO DEL MATERIAL COMPUESTO 6061/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/22p. Universitat Politècnica de Barcelona.