

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y MICROESTRUCTURAL DE UNIONES
DISÍMILES DE ALEACIONES DE Al A6061-T6 Y A7075-T6, Y Mg AZ31B
MEDIANTE EL PROCESO DE FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW)**

POR

ING. DANIELA HERNÁNDEZ GARCÍA

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA

15 ABRIL DE 2016

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y MICROESTRUCTURAL DE UNIONES
DISÍMILES DE ALEACIONES DE Al A6061-T6 Y A7075-T6, Y Mg AZ31B
MEDIANTE EL PROCESO DE FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW)**

POR

ING. DANIELA HERNÁNDEZ GARCÍA

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA

15 ABRIL DE 2016

AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA) por permitirme realizar este trabajo en sus instalaciones y por la beca académica brindada para lograr la culminación de mis estudios de especialidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), por ser el proveedor de los recursos económicos para la manutención durante el desarrollo de esta monografía.

A la Dra. Rocío Saldaña Garcés y al Dr. Felipe de Jesús García Vázquez, por su dedicación, tiempo y conocimientos otorgados para la realización de este trabajo.

A Cindy, Bryan, Rubén y Martín, por brindarme su amistad y apoyo incondicional durante el tiempo que llevamos de conocernos. No soy muy buena con las palabras pero les agradezco mucho por estar conmigo a lo largo de esta etapa.

A todas esas personas que en algún momento ayudaron y aportaron a este trabajo, gracias.

DEDICATORIA

A mis padres, Francisco Hernández y Alma García por el amor incondicional que siempre me han dado sin necesidad de demostrarles nada. Por haberme guiado con su ejemplo en cada etapa de mi vida.

A mis abuelos, Fernando García y Esther Vázquez por ser unos segundos padres para mí y mis hermanas, por todo el cariño y amor brindado durante el tiempo que Dios se los permitió.

A mis hermanas, Karina y Salma Hernández por soportar todos mis cambios de humor y seguir estando ahí conmigo, perdonándome todo y compartiendo incontables momentos de alegría y diversión.

Aunque no lo diga o lo demuestre, los amo infinitamente.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA.....	ii
CONTENIDO.....	iii
SÍNTESIS.....	v
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivo general.....	2
1.2.1 Objetivos específicos.....	2
1.3 Justificación	3
1.4 Planteamiento del problema	3
1.5 Aportación tecnológica.....	3
1.6 Alcance	4
Capítulo 2 ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1 Aleaciones de aluminio.....	5
2.1.1 Propiedades de las aleaciones de aluminio	5
2.1.2 Clasificación de las aleaciones de aluminio	7
2.1.3 Aplicaciones de las aleaciones de aluminio	11
2.1.4 Aleación A6061-T6.....	11
2.1.5 Aleación A7075-T6.....	12
2.1.6 Metalurgia de las aleaciones de aluminio	12
2.2 Aleaciones de magnesio.....	19
2.2.1 Propiedades de las aleaciones de magnesio.....	19
2.2.2 Clasificación de las aleaciones de magnesio.....	21
2.2.3 Aplicaciones de las aleaciones de magnesio.....	22
2.2.4 Aleación AZ31B	23
2.2.6 Metalurgia de las aleaciones de magnesio	23
2.3 Proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW)	26
2.3.1 Defectos de FSW	30
2.3.2 Ventajas y desventajas	33
2.3.3 Aplicaciones.....	34
2.3.4 Soldabilidad de las aleaciones de aluminio mediante FSW	34

2.3.5 Soldabilidad de las aleaciones de magnesio mediante FSW	37
2.3.6 Soldabilidad en uniones disímiles de aluminio y magnesio.....	39
Capítulo 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA	51
Capítulo 4 CASO DE ESTUDIO.....	54
4.1 Metodología.....	54
4.2 Materiales	55
4.3 Soldadura por FSW	56
4.4 Técnicas de caracterización	58
4.4.1 Resultados	59
4.5 Microdureza Vickers	65
4.6 Ensayo de tensión	67
CONCLUSIONES	70
Tablas	73
Figuras	75
BIBLIOGRAFÍA	79
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	82

SÍNTESIS

En el presente trabajo de investigación monográfica se reúne información del estado del arte acerca de las uniones disímiles de Aluminio/Magnesio con la finalidad de conocer el efecto que tiene la soldadura por fricción-agitación (FSW, por sus siglas en inglés). De forma adicional se muestran los resultados de un caso de estudio en el que se unieron las aleaciones de aluminio (A6061-T6 y A7075-T6) con una aleación de magnesio (AZ31B) mediante el FSW. Después se realizó una caracterización mediante microscopía óptica para observar la microestructura de las uniones soldadas, posteriormente se realizaron pruebas mecánicas (ensayo de tensión y microdureza). Los resultados obtenidos muestran que existe una formación de compuestos intermetálicos, los cuales se confirmaron con los valores obtenidos en las pruebas mecánicas y fueron comparados con la bibliografía analizada.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las aleaciones de aluminio y las de magnesio son ampliamente utilizadas en la industria automotriz y aeroespacial debido a su excelente combinación de bajo peso y elevada resistencia (1). La aplicación de ambas aleaciones proporciona simultáneamente una mayor flexibilidad de diseño y mejora la respuesta mecánica con un peso reducido, pero la combinación de estas aleaciones disímiles exige un proceso de unión fiable; sin embargo, los procesos de soldadura convencionales por fusión han mostrado algunas desventajas, tales como una gran zona afectada por el calor (ZAC), el agrietamiento por solidificación, porosidad, la pérdida de los elementos de aleación por evaporación (2) y la formación de compuestos intermetálicos de gran tamaño que muestran un gran efecto negativo sobre las propiedades mecánicas en la soldadura (1,3).

El proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW, por sus siglas en inglés), ofrece una mejor calidad de unión de las aleaciones de aluminio y magnesio debido a que existe una menor formación de compuestos intermetálicos por la temperatura relativamente baja de procesamiento y los que se llegan a formar en este proceso

son dispersos bajo la acción combinada de una elevada velocidad de deformación y severa deformación plástica durante la soldadura (3). El proceso FSW, también puede reducir los defectos de soldadura tales como las inclusiones de óxido, porosidad, grietas y deformaciones (4).

Es importante mencionar que los parámetros del proceso de soldadura por fricción-agitación tienen una gran influencia sobre las propiedades microestructurales y mecánicas de las uniones soldadas (4).

1.2 Objetivo general

Analizar el comportamiento mecánico y microestructural de uniones disímiles de aleaciones de aluminio A6061-T6 y A7075-T6 y de magnesio AZ31 mediante el proceso de soldadura por fricción-agitación.

1.2.1 Objetivos específicos

- Recopilar información de aleaciones de aluminio A6061-T6/A7075-T6 y de magnesio AZ31, además del proceso de soldadura por fricción-agitación.
- Identificar en la literatura los parámetros requeridos para llevar a cabo uniones disímiles de dichas aleaciones mediante el proceso de soldadura por fricción agitación.
- Realizar un caso de estudio de uniones disímiles de las aleaciones antes mencionadas mediante el proceso de soldadura por fricción agitación empleando los parámetros encontrados en la literatura.
- Analizar el efecto a nivel microestructural mediante microscopía óptica y en propiedades mecánicas por microdureza y tensión, del proceso de soldadura en este tipo de uniones.

1.3 Justificación

En la actualidad se ha incrementado el uso de aleaciones de aluminio y magnesio en las industrias automotriz y aeroespacial por su excelente relación de alta resistencia y baja densidad. Al emplear procesos de soldadura convencionales para unir estos dos tipos de materiales, se genera una serie de defectos debido al calor empleado, afectando negativamente las propiedades mecánicas. De lo anterior surge la necesidad de inquirir sobre otros procesos de unión para estos materiales. En base a ello, la importancia de esta monografía radica en el uso del proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW, por sus siglas en inglés) el cual es un método alternativo que puede disminuir considerablemente los defectos presentes en las uniones, mejorando de esta manera sus propiedades mecánicas.

1.4 Planteamiento del problema

Los procesos de soldadura convencionales por fusión que se emplean en la unión de aleaciones de aluminio y magnesio ocasionan la formación de defectos, provocando una disminución en las propiedades mecánicas en la soldadura, por tal motivo es necesario el uso de otra técnica de unión, tal como el proceso FSW, sin embargo es importante conocer el efecto de los parámetros que se emplean en este proceso sobre las características microestructurales y propiedades mecánicas en la soldadura.

1.5 Aportación tecnológica

Se aportará conocimiento tecnológico acerca del estudio de uniones de aleaciones de aluminio A6061-T6 – A7075-T6, y magnesio AZ31B mediante la soldadura por fricción-agitación (FSW). Este estudio proporcionará, además de información importante de las uniones disímiles de aleaciones ligeras mediante el

proceso, el efecto que éste causa sobre las características microestructurales y propiedades mecánicas para su empleo en la industria automotriz y aeronáutica.

1.6 Alcance

El alcance de este proyecto es buscar y analizar información científica y tecnológica sobre el efecto de las propiedades mecánicas en uniones disímiles de aleaciones de aluminio A6061-T6 y A7075-T6, con magnesio AZ31B mediante la soldadura por fricción-agitación (FSW).

CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Aleaciones de aluminio

El aluminio es uno de los principales componentes de la corteza terrestre, de la que forma parte en una proporción del 8%, solamente superada por el oxígeno (47%) y entre los metales por el silicio (27%).

El aluminio no se encuentra puro en la naturaleza, sino formando parte de los minerales, de los cuales los más importantes son las bauxitas, que fueron descubiertas por primera vez por Les Baux en Francia y con el proceso Hall-Heroult, se permitió obtener el mineral en estado líquido, convirtiéndose en uno de los materiales más utilizados (5).

2.1.1 Propiedades de las aleaciones de aluminio

El aluminio puro cuenta con características únicas e importantes como la resistencia a la corrosión y conductividad eléctrica. Sin embargo, debido a su resistencia relativamente baja, no es un material adecuado para aplicaciones estructurales, pero al ser aleado con otros elementos sus propiedades mejoran,

logrando que sea utilizado ampliamente en la industria automotriz y aeronáutica (5). Algunas de sus propiedades más importantes se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Propiedades físicas y mecánicas del aluminio (6,7).

Propiedades físicas	
Densidad	2.7 g/cm ³
T de fusión	660°C
T de ebullición	2467°C
Conductividad térmica	238 W/m-K
Conductividad eléctrica	64% IACS
Propiedades mecánicas	
Módulo de elasticidad	70 GPa
Resistencia a la tracción	700 MPa
% de elongación	60

Mediante la adición de elementos tales como cobre (Cu), manganeso (Mn), magnesio (Mg), silicio (Si), zinc (Zn) y combinaciones de estos elementos, es posible obtener diferentes características físicas y mecánicas del aluminio puro (5).

Los principales efectos de los elementos de aleación son los siguientes (5):

- Cobre (Cu): Provee un incremento sustancial de la resistencia y facilita el endurecimiento por precipitación. La adición del cobre puede reducir la resistencia a la corrosión, ductilidad y soldabilidad.
- Manganeso (Mn): Mejora la resistencia a través de solución sólida y aumenta la capacidad de endurecimiento por deformación sin reducir apreciablemente la resistencia a la corrosión o la ductilidad.
- Silicio (Si): Reduce la temperatura de fusión y mejora la fluidez, también en combinación con el magnesio facilita el endurecimiento por precipitación.
- Magnesio (Mg): Incrementa la resistencia a través de solución sólida y mejora la capacidad de endurecimiento por deformación.

- Zinc (Zn): Junto a algunos elementos (principalmente magnesio y/o cobre) produce en las aleaciones tratables térmicamente una mayor resistencia. El zinc incrementa sustancialmente la resistencia y facilita el endurecimiento por precipitación, puede ser susceptible a la corrosión bajo tensión.
- Hierro (Fe): Es una impureza que incrementa la resistencia en el aluminio puro.
- Cromo (Cr): Reduce la susceptibilidad de la corrosión bajo tensión y mejora la tenacidad.
- Níquel (Ni): Se adiciona a las aleaciones de aluminio-cobre y aluminio-silicio para mejorar la dureza y la resistencia a altas temperaturas.
- Titanio (Ti): Es principalmente empleado como refinador de grano.
- Circonio (Zr): Es utilizado para formar precipitados finos de compuestos intermetálicos que impiden la recristalización.
- Litio (Li): Mejora sustancialmente la resistencia y el módulo de Young, disminuye la densidad y promueve el endurecimiento por precipitación.
- Plomo (Pb) y bismuto (Bi): Se adicionan al aluminio para ayudar en la formación de viruta y mejorar la maquinabilidad.

2.1.2 Clasificación de las aleaciones de aluminio

Las aleaciones de aluminio se pueden clasificar en dos principales grupos denominados como aleaciones para forja y aleaciones para fundición, según el método de fabricación, ya sea, mediante procesos de conformación plástica o por fundición. También se clasifican dependiendo de los elementos aleantes que contenga la aleación y finalmente se agrupan según el grado de endurecimiento aplicado. Las aleaciones de aluminio se designan siguiendo el sistema que se muestra en la Tabla 2.2 en donde el primer número define los principales elementos de aleación, el segundo se refiere a las modificaciones de la aleación y los dos últimos números representan la cantidad mínima que contienen de aluminio en la serie 1XXX, en otras series, el tercero y cuarto dígitos identifican las diferentes aleaciones en el grupo y no tienen importancia numérica (7,8). El sistema utilizado

para clasificar las aleaciones es muy similar tanto para aleaciones forjadas como para las aleaciones de fundición, éstas últimas se distinguen por el uso del punto decimal que indica la forma del producto, 1 o 2 es en lingote (dependiendo de la pureza) y cero es para fundición (7).

A las aleaciones de forja se les da forma mediante una deformación plástica y sus propiedades son controladas por medio de un endurecimiento por deformación, endurecimiento por solución sólida y control del tamaño del grano. Sin embargo, debido a que a temperatura ambiente la solubilidad de los elementos de aleación en el aluminio es pequeña, el grado de endurecimiento por solución sólida es limitada (7).

En cuanto a las aleaciones para fundición, la mayoría de éstas contienen una cantidad de silicio para provocar una reacción eutéctica que disminuye los puntos de fusión obteniendo una buena fluidez y la facilidad para lograr una buena fundición, así como una contracción pequeña para tener poca formación de grietas (7).

Tabla 2.2 Clasificación de las aleaciones de aluminio según el método de fabricación (7).

Aleaciones para forja			
1XXX	Aluminio puro >99%	comercialmente	No es endurecible por envejecimiento
2XXX	Al-Cu y Al-Cu-Li		Endurecible por envejecimiento
3XXX	Al-Mn		No es endurecible por envejecimiento
4XXX	Al-Si y Al-Mg-Si		Endurecible por envejecimiento si está presente el magnesio
5XXX	Al-Mg		No es endurecible por envejecimiento
6XXX	Al-Mg-Si		Endurecible por envejecimiento
7XXX	Al-Mg-Zn		Endurecible por envejecimiento
8XXX	Al-Li, Sn, Zr o B		Endurecible por envejecimiento
Aleaciones para fundición			
1XX.X	Aluminio puro	comercialmente	No es endurecible por envejecimiento
2XX.X	Al-Cu		Endurecible por envejecimiento
3XX.X	Al-Si-Cu o Al-Mg-Si		Algunos son endurecibles por envejecimiento
4XX.X	Al-Si		No es endurecible por envejecimiento
5XX.X	Al-Mg		No es endurecible por envejecimiento
7XX.X	Al-Mg-Zn		Endurecible por envejecimiento
8XX.X	Al-Sn		Endurecible por envejecimiento

También las aleaciones de aluminio pueden incluir una letra seguida de un número que indica el grado de endurecimiento, ya sea mediante un tratamiento térmico o mecánico, dicha clasificación se puede observar en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Clasificación para las aleaciones de aluminio según el grado de endurecimiento (5,7).

F	Tal como se fabricó (trabajo en caliente, forja, fundición, etc.)
O	Recocido (en el estado más blando posible)
H	Trabajado en frío
H1X	Trabajado en frío solamente (La x se refiere a la cantidad de trabajo en frío y de endurecimiento)
H12	Trabajado en frío que proporciona una resistencia a la tensión intermedia entre 0 y H14
H14	Trabajado en frío que aporta una resistencia a la tensión intermedia entre 0 y H18
H16	Trabajado en frío que proporciona una resistencia a la tensión intermedia entre H14 y H18
H18	Trabajado en frío que resulta en una reducción de aproximadamente de 75%
H19	Trabajado en frío que proporciona una resistencia a la tensión superior a los 2000 psi de la obtenida mediante el H18
H2X	Trabajado en frío y parcialmente recocida
H3X	Trabajado en frío y estabilizada a una temperatura baja, para evitar endurecimiento por envejecimiento de la estructura
W	Tratada por solución
T	Endurecida por envejecimiento
T1	Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida naturalmente
T2	Enfriada desde la temperatura de fabricación , trabajada en frío y envejecida naturalmente
T3	Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida naturalmente
T4	Tratada por solución y envejecida naturalmente
T5	Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida artificialmente
T6	Tratada por solución y envejecida artificialmente
T7	Tratada por solución, estabilizada por sobre envejecimiento
T8	Tratada por solución, tratada en frío y envejecida artificialmente
T9	Tratada por solución, envejecida artificialmente y trabajada en frío
T10	Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y artificialmente envejecida

2.1.3 Aplicaciones de las aleaciones de aluminio

Las aplicaciones principales del aluminio y sus aleaciones, según su consumo, se dan en contenedores y empaques (latas y papel aluminio), en edificios y otros tipos de construcción, transporte como en aviones y naves aeroespaciales, autobuses, carros de ferrocarril y artículos marinos, en aplicaciones eléctricas como conductor eléctrico económico y no magnético, productos de consumo durables (artículos domésticos, utensilios de cocina y muebles) y herramientas portátiles (8).

2.1.4 Aleación A6061-T6

La aleación de aluminio A6061 es muy utilizada ya que puede ser endurecida por precipitación, lo que hace que tenga una importancia práctica considerable por esa capacidad de mejorar sus características físicas y mecánicas específicas. Esta aleación es usada en productos extruidos, marcos de bicicletas, estructuras soldadas, en la industria automotriz y aeroespacial, entre otras (9). Posee una excelente resistencia a la corrosión y acabado, además de que presenta una buena aptitud a la soldadura y una resistencia parecida a la del acero (10). Los elementos que contiene esta aleación se muestran en la Tabla 2.4, generalmente se somete a un tratamiento térmico de envejecimiento artificial, sus propiedades físicas se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.4 Composición química de la aleación A6061 (11).

% e.p	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros	Al
Mín.	0.40	-	0.15	-	0.80	0.04	-	-	-	-	-
Máx.	0.8	0.7	0.4	0.15	1.20	0.35	-	0.25	0.15	0.15	Resto

Tabla 2.5 Propiedades físicas y mecánicas de la aleación A6061 (11).

Densidad g/cm ³	Intervalo de fusión °C	Conductividad térmica W/mK	Resistencia a la tensión MPa	Límite de cedencia MPa	Dureza Brinell (500 Kg de carga)
2.70	580-650	155-180	310	276	95

2.1.5 Aleación A7075-T6

La aleación de aluminio A7075 es una de las aleaciones más utilizadas actualmente en la industria debido a su elevada relación de resistencia-peso y a la facilidad de endurecer mediante envejecimiento, lo que hace que esta aleación sea atractiva para un gran número de aplicaciones estructurales de aeronaves y en la industria automotriz (12). También esta aleación es muy adecuada para piezas sometidas a fatigas en aplicaciones industriales debido a su elevado límite elástico (11). Los elementos que contiene la aleación A7075 se pueden observar en la Tabla 2.6, el tratamiento térmico al que es sometida esta aleación es a un envejecimiento artificial. En la Tabla 2.7 se muestran sus propiedades físicas.

Tabla 2.6 Composición química de la aleación A7075 (11).

%e.p.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros	Al
Mín.	-	-	1.20	-	2.1	0.18	-	5.1	-	-	-
Máx.	0.4	0.5	2	0.3	2.9	0.28	-	6.10	0.2	0.15	Resto

Tabla 2.7 Propiedades físicas de la aleación A7075 (11).

Densidad g/cm ³	Intervalo de fusión °C	Conductividad térmica W/Mk	Resistencia a la tensión MPa	Límite de cedencia MPa	Dureza Brinell (500 Kg de carga)
2.81	475-635	134-175	524	462	150

2.1.6 Metalurgia de las aleaciones de aluminio

El aluminio puro y sus aleaciones tienen una estructura cúbica centrada en las caras (FCC), la cual es estable hasta su punto de fusión. Debido a que la estructura FCC contiene múltiples planos de deslizamiento, esta estructura cristalina contribuye en gran medida a la excelente conformabilidad de las aleaciones de aluminio (13).

Los elementos que se encuentran comúnmente en las aleaciones de aluminio para proporcionar una mayor resistencia, sobre todo cuando se combina con un

endurecimiento por deformación por trabajo en frío o con un tratamiento térmico, o ambos, son cobre, magnesio, manganeso, silicio y zinc. Estos elementos tienen una solubilidad significativa en el aluminio sólido, y en todos los casos la solubilidad aumenta cuando la temperatura incrementa (Figura 2.1) y los demás elementos son menos solubles. La máxima solubilidad sólida en las aleaciones de aluminio se produce a la temperatura eutéctica, peritética o monotéctica (14). En la Tabla 2.8 se presentan los valores de la solubilidad sólida en el aluminio de los elementos de aleación más comúnmente encontrados.

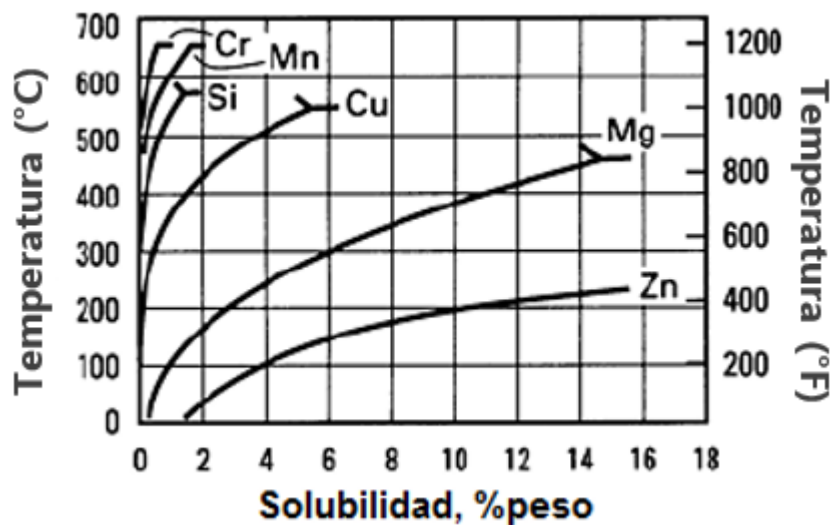


Figura 2.1 Equilibrio de la solubilidad sólida binaria como una función de la temperatura para elementos de aleación más frecuentemente encontrados en el aluminio (14).

Tabla 2.8 Solubilidad sólida de varios elementos de aleación en el aluminio (15).

Elemento	Temperatura (°C)	Máxima solubilidad sólida	
		%e.p	%at
Cobalto (Co)	657	<0.02	<0.01
Cobre (Cu)	548	5.65	2.40
Cromo (Cr)	661	0.77	0.40
Hierro (Fe)	655	0.05	0.025
Litio (Li)	600	4.2	16.3
Magnesio (Mg)	450	17.4	18.5
Manganeso (Mn)	658	1.82	0.90
Níquel (Ni)	640	0.04	0.02
Silicio (Si)	577	1.65	1.59
Titanio (Ti)	665	~1.3	~0.74
Zinc (Zn)	443	82.8	66.4
Zirconio (Zr)	660.5	0.28	0.08

i. La máxima solubilidad sólida ocurre a temperaturas eutécticas para todos los elementos excepto en el cromo, titanio, zinc y zirconio en los cuales ocurre a temperaturas peritéticas

Cuando el contenido de un elemento de aleación excede el límite de solubilidad en el sólido, éste produce una fase secundaria que puede consistir en un elemento o un compuesto intermetálico. Los elementos aleantes que forman fases secundarias de sólo un elemento son el silicio, estaño y el berilio; si la aleación es ternaria, el silicio y estaño pueden formar compuestos intermetálicos o de orden mayor, donde están presentes la mayoría de los elementos de aleación como el cobre, el magnesio, el manganeso y el zinc (14).

Las fases formadas con algunos elementos de aleación se describen a continuación (16,17):

- Hierro (Fe): Prácticamente todas las aleaciones de aluminio contienen hierro como una impureza. Durante la solidificación de una aleación Al-Fe que contiene un porcentaje bajo de hierro, la mayor parte de éste permanece en

fase líquida hasta que el eutéctico de solución sólida y las partículas constituyentes intermetálicas de Al_3Fe tienen una estructura cristalina monoclinica durante su enfriamiento. Dependiendo de la velocidad de enfriamiento y de la presencia de otros elementos como el manganeso, se pueden formar partículas constituyentes de la fase metaestable Al_6Fe ortorrómbica en lugar del Al_3Fe en equilibrio.

- Silicio (Si): El silicio también está presente como una impureza. Dos fases ternarias se forman mediante una reacción eutéctica, $\alpha\text{-Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}$ cúbica y $\beta\text{-Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ monoclinica.
- Magnesio (Mg): En aleaciones tratables térmicamente (Al-Si-Mg) con contenidos suficientes de silicio se forman precipitados de Mg_2Si .
- Zinc (Zn): El zinc no ofrece un gran fortalecimiento en la aleación, pero los precipitados de aluminio, zinc y magnesio otorgan dos fases que proporcionan una mayor resistencia. Dependiendo de la relación de Zn:Mg se pueden formar dos fases, MgZn_2 con estructura hexagonal y $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ con una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC), mediante una descomposición eutéctica en las aleaciones Al-Zn-Mg.

Las principales preocupaciones en la metalurgia física de las aleaciones de aluminio además de los efectos de la composición, también son el trabajo mecánico, y/o el tratamiento térmico en las propiedades mecánicas y físicas. En términos de propiedades, la mejora de la resistencia es un objetivo importante en el diseño de aleaciones de aluminio, porque la baja resistencia del aluminio puro limita su uso comercial. Los dos métodos más comunes para aumentar la resistencia de las aleaciones de aluminio son los siguientes (14):

- Un trabajado en frío de la aleación y/o dispersar los constituyentes de la segunda fase o elementos en solución sólida (aleaciones no tratables térmicamente).
- Disolver los elementos de la aleación en solución sólida y formar precipitados coherentes (aleaciones tratables térmicamente).

Las aleaciones de aluminio forjadas normalmente se encuentran clasificadas en 2 grupos: aleaciones no tratables térmicamente y aleaciones tratables térmicamente. Las que no son tratables térmicamente, no pueden fortalecerse mediante el endurecimiento por precipitación; se endurecen principalmente por trabajo en frío. Estas incluyen la serie de aluminio comercial puro (1XXX), la de aluminio-manganeso (3XXX), la serie de aluminio-silicio (4XXX), y la serie de aluminio-magnesio (5XXX). Si bien algunas de las aleaciones de las series 4XXX se pueden endurecer mediante tratamiento térmico, otras sólo se pueden endurecer por trabajo en frío. Las aleaciones de las series 2XXX (Al-Cu y Al-Cu-Mg), 6XXX (Al-Mg-Si), 7XXX (Al-Zn-Mg y Al-Zn-Mg-Cu), y aleaciones de aluminio-litio de la serie de 8XXX son aleaciones tratables térmicamente que pueden ser endurecidas por precipitación obteniendo niveles muy altos de resistencia (13). El endurecimiento por precipitación consiste en tres pasos (18,19):

1. Tratamiento térmico de solución: la aleación se calienta a una temperatura suficientemente alta para poner a los elementos de aleación en solución.
2. Enfriar rápidamente a una temperatura inferior para mantener los elementos de aleación atrapados en solución.
3. Envejecimiento: los elementos de aleación atrapados previamente, precipitan para formar una distribución uniforme de partículas muy finas. Esta fina distribución de precipitados fortalece y endurece la aleación mediante la creación de obstáculos para el movimiento de las dislocaciones.

En la Figura 2.2 se muestra la aleación Al-4% Cu para ejemplificar el endurecimiento por precipitación.

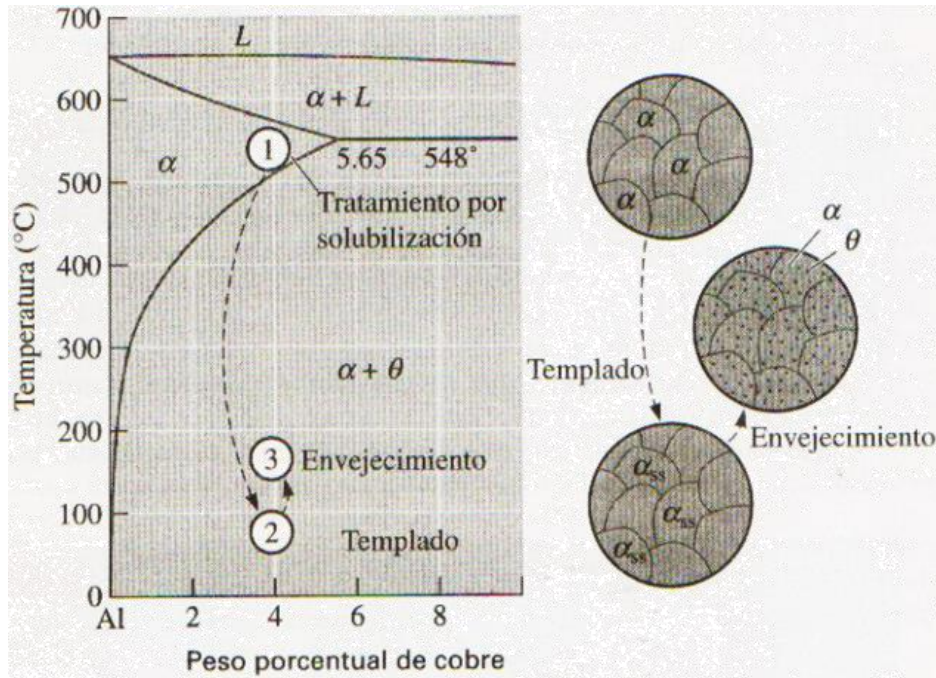


Figura 2.2 Extremo rico en aluminio del diagrama de fases aluminio-cobre, mostrando los tres pasos en el tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento y las microestructuras que se producen (7).

Durante el envejecimiento, el efecto de fortalecimiento se maximiza cuando el precipitado es coherente con la matriz. Un precipitado coherente es en el que la disposición atómica del precipitado y la matriz es la misma sin ninguna discontinuidad en la red. Esto provoca un aumento en la resistencia al obstruir y retardar el movimiento de dislocación. Estos grupos de soluto precipitado se llaman zonas de Guinier-Preston (GP) que son dominios ricos de soluto totalmente coherentes con la matriz. Durante el calentamiento, las zonas GP desarrollan precipitados coherentes o semicoherentes más finos que endurecen en mayor proporción la aleación y finalmente éstos serán reemplazados por precipitados incoherentes (un precipitado incoherente es aquel en el que la disposición atómica del precipitado y la matriz no es la misma) que inhiben el movimiento de las dislocaciones endureciendo a la aleación (19). La secuencia de endurecimiento por precipitación para las series 6XXX y 7XXX se muestran en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Secuencia de precipitación de las aleaciones de aluminio de las series 6XXX y 7XXX (20).

Serie	Precipitados	Comentarios
Al-Mg-Si (serie 6XXX)	Agrupaciones de átomos de Mg o Si	Agrupaciones de Si pueden ser perjudiciales para la resistencia
	β'' ($Mg_2Si/MgSi$) coherente en forma de agujas a lo largo de $\langle 100 \rangle_\alpha$	Monoclínico
	β' (Mg_2Si) semicoherente como barras a lo largo de $\langle 100 \rangle_\alpha$	Hexagonal, se puede formar a partir de β''
	B' (Mg_2Si) semicoherente como listones en $\langle 100 \rangle_\alpha$	Hexagonal, se forma siempre con β' , favorecido por altas relaciones de Si:Mg
	β (Mg_2Si) como plaquetas en $\{100\}_\alpha$	FCC, puede transformarse en β'
Al-Zn-Mg-(Cu) (serie 7XXX)	2 tipos de zonas GP como esferas	Pueden tener una composición variable de MgZn a MgZn ₂
	η' ($MgZn_2$) semicoherente a lo largo de $\{111\}_\alpha$	Hexagonal; puede formarse a partir de las zonas GP cuando la relación Zn:Mg > 3:1
	η ($MgZn_2$) incoherente	Hexagonal; 9 relaciones posibles de orientación.
	T' $Mg_{32}(Al,[Zn/Cu])_{49}$ semicoherente	Hexagonal; puede formarse en lugar de η en aleaciones con una elevada relación Mg:Zn
	T $Mg_{32}(Al,[Zn/Cu])_{49}$ incoherente	Cúbica; se puede formar a partir de η si la temp. de envejecimiento es >190°C, o a partir de T'

En la Tabla 2.10 se muestran las características de las fases secundarias que se presentan en las aleaciones de aluminio de las series 6XXX y 7XXX.

Tabla 2.10 Características de las fases secundarias que se presentan en las aleaciones de aluminio de las series 6XXX y 7XXX (21).

Serie	Fase	Estructura cristalina	Parámetros de red	Morfología
Al-Mg-Si (serie 6XXX)	Mg ₂ Si	FCC	a=6.351	Escritura china fina, partículas dispersas
	α-AlFeSi	Cúbica	a=12.652	Escritura china
		Hexagonal	a=12.3 c=26.3	
β-AlFeSi	Monoclínica	a=6.12 b=6.12 c=41.48 α=91°	Agujas o placas	
Al-Mg-Zn (serie 7XXX)	MgZn ₂	Hexagonal	a=5. c=8.	Partículas circulares irregulares, dispersas
	Al ₂ Mg ₃ Zn ₃	BCC	a=14.15	Partículas circulares, irregular
	Al ₂ CuMg	Hexagonal	a=5.07 c=8.29	Partículas circulares irregulares, dispersas
	Al ₇ Cu ₂ Fe	Tetragonal	a=6.33 c=14.81	Agujas finas
	Al ₁₈ Mg ₃ Cr ₂	Cúbica	a=14.53	Escritura china

2.2 Aleaciones de magnesio

El magnesio, después del hierro y aluminio, es el tercer elemento metálico con mayor abundancia en la corteza terrestre con un 2%. La mayor parte es proveniente del agua de mar, la cual tiene un contenido de 0.13% de magnesio en forma de cloruro de magnesio. El magnesio metálico fue producido por primera vez en 1808, mediante electrólisis o por reducción térmica (8). Este metal es más ligero y se funde a una temperatura levemente menor que el aluminio. Sin embargo, las aleaciones de magnesio no son tan resistentes como las de aluminio pero sus resistencias específicas son comparables (7).

2.2.1 Propiedades de las aleaciones de magnesio

El magnesio cristaliza en una red hexagonal compacta (HCP), lo que justifica su fragilidad. Posee bajas temperaturas de fusión y ebullición, así como también un gran coeficiente de dilatación y un elevado calor específico (6). En muchos entornos,

la resistencia a la corrosión del magnesio es parecida a la del aluminio, pero si es expuesta a ambientes salinos, es rápidamente deteriorada. También presenta un bajo módulo de elasticidad y una inadecuada resistencia a la fatiga, al desgaste y a la termofluencia (7). Además, también tiene una mayor ductilidad y una mejor capacidad de amortiguación de sonido y vibración que el aluminio (22). Algunas de estas propiedades se muestran en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11 Propiedades físicas y mecánicas del magnesio (6).

Propiedades físicas	
Densidad	1.7 g/cm ³
T de fusión	650°C
T de ebullición	1090°C
Conductividad térmica	146 W/m-K
Conductividad eléctrica	38% IACS
Propiedades mecánicas	
Módulo de elasticidad	45 GPa
Resistencia a la tracción	400 MPa
% de elongación	1-12

Sin embargo, debido a que el magnesio puro no es suficientemente resistente, se combina con diversos elementos para obtener ciertas propiedades específicas, en particular una elevada relación de resistencia a peso (8).

Algunos de los principales efectos que se obtienen de los elementos de aleación en el magnesio son los siguientes (23):

- Aluminio (Al): La combinación óptima de resistencia y ductilidad se observa alrededor del 6%, siendo estas aleaciones fácilmente moldeables y tratadas térmicamente para mejorar su resistencia.
- Litio (Li): Disminuye la resistencia pero incrementa la ductilidad.
- Manganeso (Mn): Permite la eliminación de impurezas (como el hierro) mediante precipitación, lo que mejora la resistencia a la corrosión.

- Tierras raras: Incrementan la resistencia a la fluencia y a elevadas temperaturas. Suele añadirse principalmente neodimio (Nd) y lantano (La).
- Silicio (Si): Incrementa la fluidez de las aleaciones fundidas.
- Plata (Ag): Mejora considerablemente la resistencia a la tracción.
- Torio (Th): En pequeñas cantidades de este aleante incrementa la resistencia a la fluencia en caliente hasta los 350°C. Su presencia mejora la moldeabilidad y la soldabilidad.
- Itrio (Y): Se utiliza junto con elementos de tierras raras para incrementar la resistencia a la fluencia y a elevadas temperaturas hasta 300°C
- Zinc (Zn): Por lo general, se utiliza junto con el aluminio, circonio, torio o tierras raras.
- Zirconio (Zr): Contribuye en gran medida como refinador de grano, con lo que mejora la ductilidad pero no beneficia en la resistencia.

Entre otros elementos aleantes o impurezas utilizadas para procesos de fabricación se puede mencionar también el berilio (Be), cobre (Cu), hierro (Fe), níquel (Ni), estaño (Sn), entre otros (23).

Al igual que las aleaciones de aluminio, a temperatura ambiente la solubilidad de los elementos de aleación en el magnesio es limitada, por lo ~~que causa~~ que el grado de endurecimiento por solución sólida que presenta sea es mínimo (7).

2.2.2 Clasificación de las aleaciones de magnesio

La clasificación utilizada tradicionalmente ha sido según su forma de fabricación con subdivisiones indicando su composición. Consecuentemente, la primera clasificación es moldeado en arena, moldeado en coquilla, fundición, forja, extrusión, laminado (plancha o chapa). A partir de éstas, se clasifican después de acuerdo a su composición. La identificación de las aleaciones de magnesio se realiza según la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) que consiste en un sistema de letras y números de cuatro partes. Cada aleación está

denominada con letras que indican los principales elementos de aleación, seguido por un número que indica el porcentaje en peso de cada uno de ellos (generalmente dos) redondeado a un entero. La Tabla 2.12 muestra las letras para cada elemento de aleación. La última letra en cada identificación indican la aleación normalizada con variaciones menores en la composición (por ejemplo la A y la B, que fueron la primera y segunda aleaciones que se normalizaron, respectivamente). En muchos casos, estas letras indican el grado de pureza o el tratamiento térmico o mecánico que ya se ha mencionado anteriormente, las cuales son las mismas designaciones que se emplean para las aleaciones de aluminio y se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (24).

Tabla 2.12 Códigos ASTM para los elementos de aleación de magnesio (23).

Letra	Elemento de aleación
A	Aluminio
C	Cobre
E	Tierras raras
H	Torio
K	Zirconio
L	Litio
M	Manganeso
Q	Plata
S	Silicio
Y	Itrio
Z	Zinc

2.2.3 Aplicaciones de las aleaciones de magnesio

Las aleaciones de magnesio suelen utilizarse en aeronaves y componentes de misiles, equipo para manejo de materiales, herramientas portátiles de potencia, escaleras, equipajes, bicicletas, artículos deportivos y componentes ligeros en general. Estas aleaciones se encuentran disponibles como fundiciones (estructuras

para cámaras fundidas a presión) o como productos forjables (barras y formas extruidas, forjas, placas y hojas laminadas). También se utilizan en maquinaria para impresión y textil, a fin de minimizar las fuerzas de inercia en componentes de alta velocidad (8).

2.2.4 Aleación AZ31B

La aleación AZ31B es una aleación de magnesio con una buena resistencia y ductilidad, combinado con soldabilidad, baja densidad y resistencia a la corrosión, que en muchas ocasiones ha remplazado las aleaciones de aluminio (25). En la Tabla 2.13 se muestra la composición química de esta aleación y en la Tabla 2.14 se puede observar algunas de sus propiedades físicas.

Tabla 2.13 Composición química de la aleación AZ31B (25).

Elemento	Mg	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ca	Fe	Ni
% e.p.	97	2.5-3.5	0.6-1.4	0.2	0.10	0.05	0.04	0.005	0.005

Tabla 2.14 Propiedades físicas y mecánicas de la aleación AZ31B (25).

Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Dureza Brinell (500 Kg de carga)	Conductividad térmica (W/m-K)
260	200	44.8	49	96

2.2.6 Metalurgia de las aleaciones de magnesio

Las características claves que dominan la metalurgia física de las aleaciones de magnesio es su estructura HCP y el hecho de que su diámetro atómico sea de 0.320 nm, permite que sea un tamaño favorable para la formación de soluciones sólidas con una gran variedad de elementos usados como soluto (15). En la Tabla 2.15 se muestran los datos de solubilidad para las aleaciones de magnesio binarios; aparte del magnesio y cadmio, que forman una serie continua de soluciones sólidas, las secciones ricas en magnesio de los diagramas de fases muestran más comúnmente

sistemas peritéticos o eutécticas. Algunos de estos elementos pueden formar una amplia gama de compuestos intermetálicos (15).

Tabla 2.15 Datos de solubilidad para las aleaciones de magnesio binarios (15).

Elemento	%e.p.	%at.	Sistema
Litio (Li)	5.5	17	Eutéctico
Aluminio (Al)	12.7	11.8	Eutéctico
Plata (Ag)	15	3.8	Eutéctico
Itrio (Y)	12.5	3.75	Eutéctico
Zinc (Zn)	6.2	2.4	Eutéctico
Neodimio (Nd)	~3	~1	Eutéctico
Zirconio (Zr)	3.8	1	Peritético
Manganeso (Mn)	2.2	1	Peritético
Torio (Th)	4.75	0.52	Eutéctico
Cerio (Ce)	0.5	0.1	Eutéctico
Indio (In)	53.2	19.4	Peritético
Talio (Tl)	60.5	15.4	Eutéctico
Cadmio (Cd)	100	100	Completa
Escandio (Sc)	~24.5	~15	Peritético
Plomo (Pb)	41.9	7.75	Eutéctico
Tulio (Tm)	31.8	6.3	Eutéctico
Terbio (Tb)	24	4.6	Eutéctico
Estaño (Sn)	14.5	3.35	Eutéctico
Galio (Ga)	8.4	3.1	Eutéctico
Iterbio (Yb)	8	1.2	Eutéctico
Bismuto (Bi)	8.9	1.1	Eutéctico
Calcio (Ca)	1.35	0.82	Eutéctico
Samario (Sm)	~6.4	~1	Eutéctico
Oro (Au)	0.8	0.1	Eutéctico
Titanio (Ti)	0.2	0.1	Peritético

Una característica de este sistema de aleaciones en donde la solución sólida está fuertemente influenciada por el tamaño de los átomos, es que generalmente la solubilidad es menor cuando la temperatura disminuye. Esta característica es un requerimiento necesario para el endurecimiento por precipitación, aunque las respuestas son menos significativas que lo observado en algunas aleaciones de aluminio(15). La resistencia de las aleaciones de magnesio ya endurecidas por precipitación depende del tamaño, la distribución y la fracción en volumen de los

precipitados y, de la naturaleza de la interfaz entre los precipitados y la matriz, si es coherente o incoherente. Las dislocaciones pueden ser capaces de cortar los precipitados finos pero no pueden romper precipitados de gran tamaño incoherentes, por lo que las dislocaciones se arquean entre ellas (23).

A continuación se muestra la probable precipitación de las aleaciones de Mg-Al (15,21):

Solución sólida sobresaturada → Precipitado en equilibrio $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ con estructura BCC (incoherente)

Las fases formadas con algunos elementos de aleación se describen a continuación:

- Aluminio: El aluminio es uno de los pocos metales que se disuelve fácilmente en el magnesio. Por encima del límite de solubilidad, precipita un intermetálico frágil, $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$, el cual desempeña un papel dominante en la determinación de las propiedades (23).

La precipitación de $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ de la solución sólida puede ser continua o discontinua a temperaturas de envejecimiento por encima de aproximadamente 205°C (400°F) apareciendo con un estructura Widmanstätten. La precipitación discontinua comienza en los límites de grano y tiene una forma laminar, se ve favorecida a temperaturas más bajas de envejecimiento y un contenido de aluminio por encima del 8%. Aproximadamente a 290°C (550°F) el precipitado laminar comienza a coalescer y aproximadamente a los 370°C (700°F) se redisuelve en la matriz (21).

- Zinc: Con 6.2% de zinc hay una total solubilidad a la temperatura eutéctica (340°C). Cuando el zinc es añadido en aleaciones de magnesio-aluminio, la mezcla eutéctica de magnesio-aluminio toma una forma completamente separada, en la cual las partículas de $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ están rodeadas por la solución sólida de magnesio (21).

- **Manganeso:** En aleaciones de magnesio que contienen manganeso pero no aluminio, el manganeso aparece como partículas elementales primarias. Combinaciones de manganeso con aluminio forman compuestos de $MnAl$, $MnAl_4$ o $MnAl_6$. Las partículas de compuesto de manganeso-aluminio a menudo ocurren en forma de trozos y agujas (21).
- **Silicio:** Está presente en las aleaciones de magnesio como partículas de Mg_2Si . Estas partículas se distinguen por su contorno angular, bordes suaves y de color azul claro (21).

2.3 Proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW)

La soldadura por fricción- agitación (Friction Stir Welding, FSW) (Figura 2.3) fue desarrollada en 1991 por el Instituto de Soldadura de Inglaterra (TWI), es uno de los procesos de unión más efectivos en estado sólido aplicado principalmente a aleaciones ligeras. El proceso se basa esencialmente en una herramienta giratoria no consumible que sostiene un pin (tornillo sin cabeza) y tiene un hombro, esta herramienta es insertada entre las superficies de encuentro de los materiales a unir con una cierta velocidad de rotación y bajo una fuerza establecida como muestra en la Figura 2.4. En esta imagen, la herramienta de FSW gira en sentido horario (como las manecillas del reloj); el lado de avance se encuentra ubicado a la izquierda donde la dirección de la rotación de la herramienta es la misma que la dirección de desplazamiento de la herramienta y en la derecha se encuentra el lado de retroceso, en el cual la rotación de la herramienta es opuesta a la dirección de avance de la misma (26).

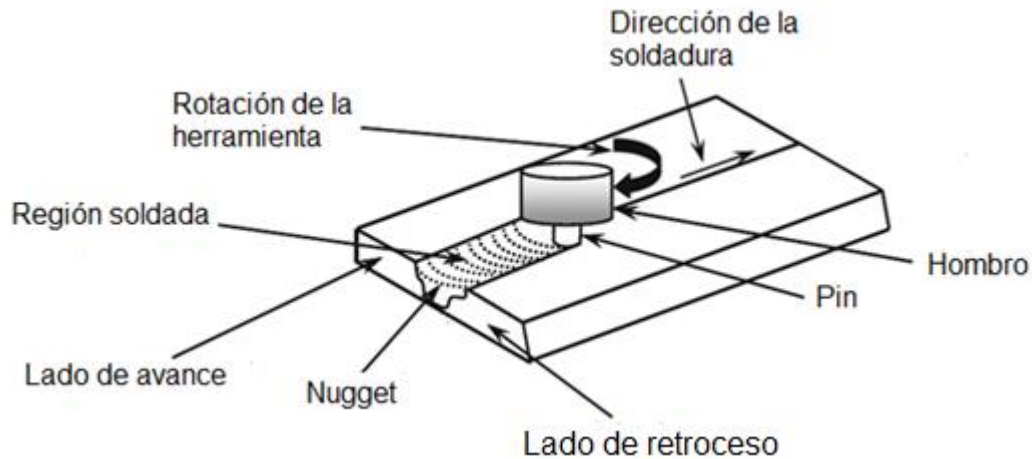


Figura 2.3 Esquema de una configuración de unión a tope mediante la soldadura por fricción-agitación (27).

La herramienta tiene tres principales funciones que son: el calentamiento de la pieza de trabajo, el movimiento del material para producir la unión y la retención del metal caliente bajo el hombro de la herramienta. El movimiento de rotación del pin y hombro genera calor por fricción que conduce a una región ablandada alrededor del pin produciendo una deformación plástica severa en la pieza de trabajo, el material plastificado alrededor del pin se transporta bajo la acción combinada de la rotación de la herramienta y su avance desde la parte frontal hacia la parte trasera del pin y de este modo se va llenando el hueco entre las piezas, el material al enfriarse va dejando una fase sólida en la unión de las piezas; mientras el hombro evita que el material deformado sea expulsado. Debido a diversas características de la herramienta, el movimiento del material alrededor del pin puede ser complejo con gradientes de tensión, temperatura y velocidad de deformación. Debido a esto, la microestructura resultante de la unión se muestra en la zona agitada por los diferentes periodos termomecánicos que experimenta y no es homogénea. A pesar de la falta de homogeneidad en la microestructura de esta zona, uno de los principales beneficios que tiene este proceso es la recristalización, mecanismo en el que se obtiene una microestructura equiaxial de grano fino generada por la intensa deformación plástica a una temperatura elevada, produciendo excelentes propiedades mecánicas (26).

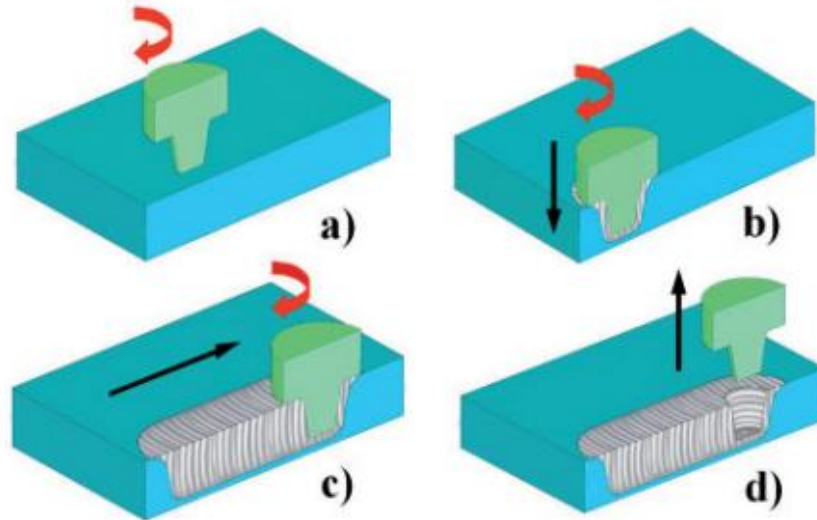


Figura 2.4 Esquema representativo del proceso FSW, a) posicionamiento y rotación, b) penetración, c) avance y d) extracción (28).

A continuación se mencionan los efectos generados en la soldadura producidos por los diversos parámetros que influyen en el proceso (29):

- Velocidad de rotación: Altas velocidades de rotación de la herramienta generan temperaturas elevadas debido a un mayor calentamiento por fricción, dando a lugar a una mayor agitación y mezcla de material.
- Velocidad de soldadura: Al incrementar la velocidad de soldadura, el tamaño de grano en la zona de agitación disminuye porque se tiene una entrada de calor inferior. La resistencia a la tracción es incrementada con el aumento de la velocidad de soldadura.
- Presión: Una presión axial influye significativamente en la formación de defectos, tamaño de grano y la dureza de la zona de agitación, y posteriormente en propiedades de tracción.
- Profundidad de penetración: Es necesario realizar una optimización de la profundidad de penetración considerando la velocidad de rotación de la herramienta, velocidad de desplazamiento, material y equipo de prueba, esto con el fin de obtener una soldadura libre de defectos.

- Geometría de las juntas: Durante el paso inicial de la herramienta, las fuerzas son bastante grandes y se requiere un cuidado especial para asegurarse de que las placas no se separan y esto depende de la geometría de las juntas.
- Ángulo de inclinación de la herramienta: Una inclinación adecuada de la herramienta hacia la dirección final asegura que el hombro sostenga el material deformado y mueva el material de manera eficiente desde la parte frontal a la parte posterior del pin.

Debido a la fricción, agitación y presión que genera la herramienta al unir las piezas, se pueden identificar diferentes zonas microestructurales que se observan en la Figura 2.5. Estas zonas de soldadura se dividen en distintas regiones de la siguiente manera (26):

- Material no afectado por el calor o metal base: Es el material más alejado de la soldadura, el cual no ha sido deformado y a pesar de haber experimentado ciclos térmicos, no es afectada por el calor a nivel microestructural o en sus propiedades mecánicas.
- Zona afectada por el calor (ZAC): En esta zona el material experimenta un ciclo térmico que modifica la microestructura y/o las propiedades mecánicas. Sin embargo, en esta región no ocurre ninguna deformación plástica.
- Zona afectada termomecánicamente (ZATM): En esta región, se deforma plásticamente el material y en el caso del aluminio es posible obtener una deformación plástica significativa sin recristalización.
- Zona agitada: Esta región está completamente recristalizada y es también llamada zona de agitación, en referencia a la zona previamente ocupada por el pin de la herramienta.

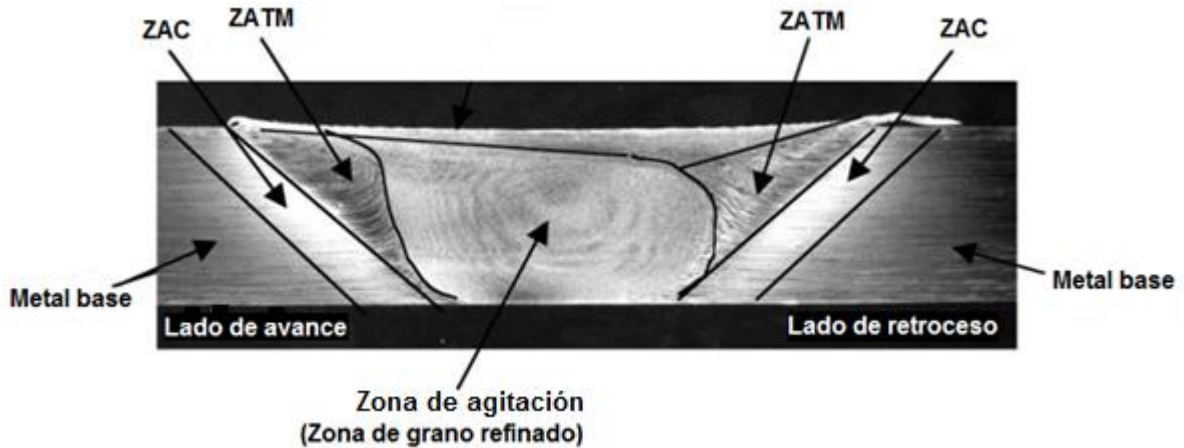


Figura 2.5 Zonas microestructurales en la sección transversal de un material soldado mediante el FSW (30).

2.3.1 Defectos de FSW

Las uniones obtenidas por FSW generalmente muestran un mejor perfil de soldadura y una superficie de calidad que los obtenidos mediante técnicas convencionales de unión, con este método, las uniones libres de defectos son posibles siempre y cuando la soldadura se lleve a cabo correctamente y se utilicen parámetros óptimos (31). Los defectos que se presentan en este tipo de soldadura pueden ser vacancias, agujeros de gusano o túneles, inclusiones de partículas de la herramienta o sustancias extrañas (aceite, grasa o suciedad), un exceso de rebaba, una concavidad excesiva, falta de penetración y desprendimientos, algunos pueden ocurrir en la raíz o en el interior de la soldadura (32). Algunos de estos defectos se pueden observar en la Figura 2.6.

El exceso de rebaba se produce por un sobrecalentamiento de la superficie debido a una significativa heterogeneidad en la generación de calor en la interface entre el hombro de la herramienta y la pieza de trabajo (31), también puede ser resultado de los ajustes de la herramienta o el uso de parámetros inadecuados. Esto puede dar a lugar a una soldadura significativamente cóncava, causando un adelgazamiento en ésta (32).

La herramienta que se emplea en el FSW es normalmente no consumible, sin embargo, el desgaste que se produce en ella puede causar defectos en la soldadura, ya que puede dejar inclusiones de partículas del material de la herramienta en el material soldado, lo cual no es aceptable ya que las partículas de la herramienta embebidas tienen un efecto perjudicial sobre las propiedades de la unión (32). Otro posible defecto de este proceso es la formación de un canal hueco conocido como agujero de gusano o “túnel”, localizado en la parte inferior de la soldadura en la zona de agitación, puede ser causado por una unión incompleta debido a un incorrecto uso del herramental o por los parámetros empleados en la soldadura (31).

Muchos materiales que son soldados mediante FSW desarrollan una capa de óxido superficial, esta capa puede ser vista parcialmente dispersa o se observa un rastro en la línea de unión original que pueden estar presentes en la raíz de la soldadura. Estas huellas son denominadas como remanentes de óxido (ROL, por sus siglas en inglés), y pueden ser óxidos atrapados, óxidos residuales, además curvas en forma de S por la morfología que presentan.

Por último los desprendimientos (Figura 2.7), este defecto produce un daño mecánico y es causado por las condiciones de procesamiento como una agitación insuficiente para dispersar la capa de óxido que no permite la unión ideal y completa o por una inadecuada alineación de la herramienta (32).

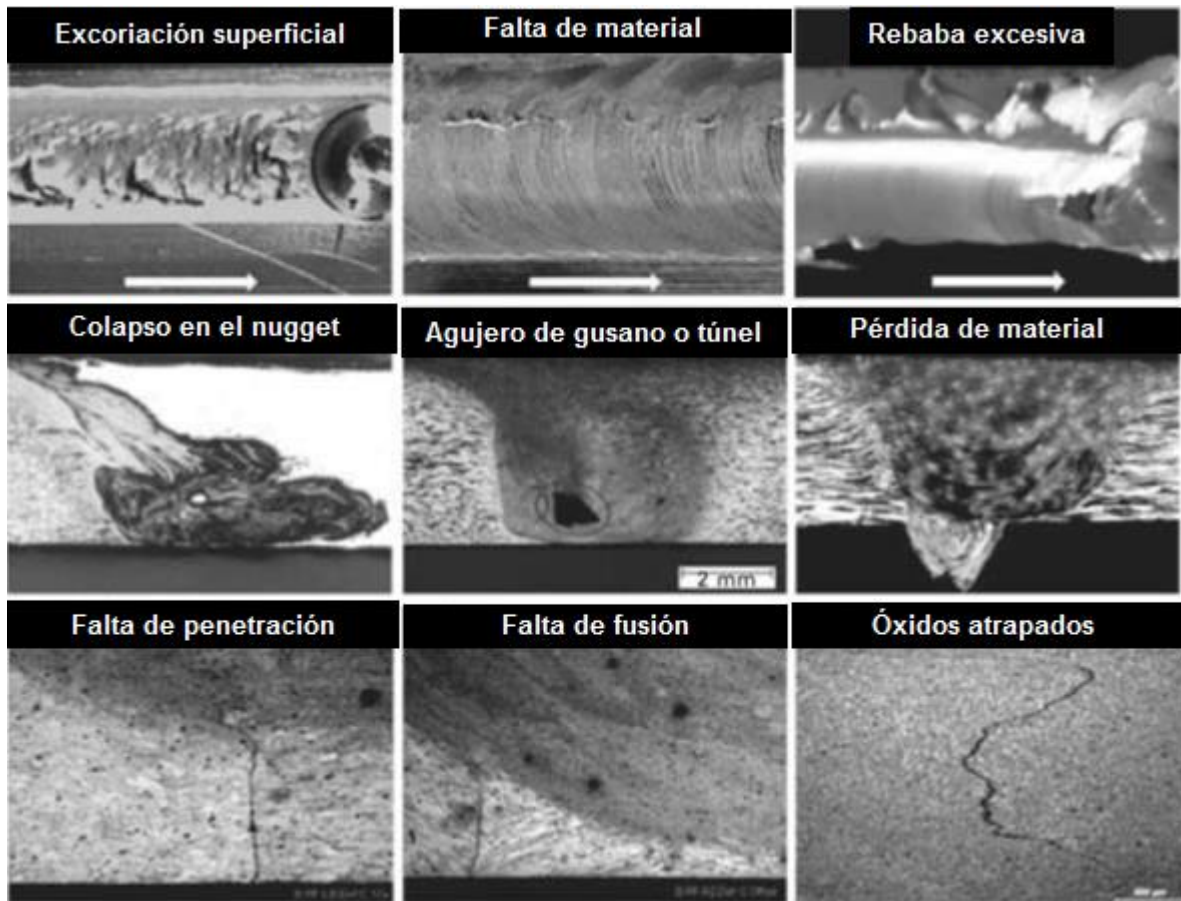


Figura 2.6 Algunos defectos que se presentan en la soldadura por fricción-agitación (FSW) (33).

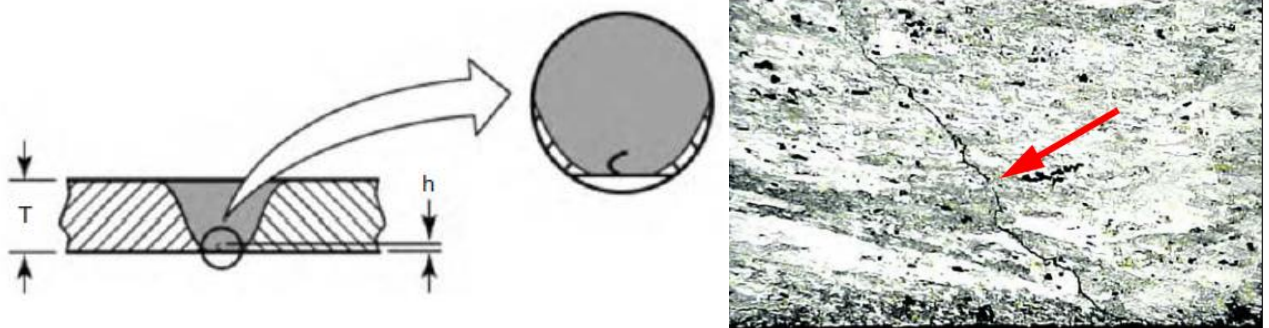


Figura 2.7 Defecto conocido como kissing-bond (34).

2.3.2 Ventajas y desventajas

El FSW es uno de los desarrollos más significativo en la actualidad sobre la unión de metales y es una tecnología "verde" debido a su eficiencia energética, respeto al medio ambiente y la versatilidad, sus principales ventajas se muestran en la Tabla 2.16 (29).

Tabla 2.16 Ventajas del proceso FSW (26,29).

Metalúrgicas	Ambientales	Energéticas
<ul style="list-style-type: none"> • Proceso en fase sólida • Baja distorsión • Buena estabilidad dimensional y la repetitibilidad • No hay pérdida de elementos de aleación • Microestructura fina recristalizada • Ausencia de grietas en la solidificación • Suelda todas las aleaciones de aluminio y magnesio • Formabilidad post-FSW 	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere gas protector • Limpieza mínima de la superficie • No tiene residuos • No requiere disolventes para desengrasar • Ahorro de los consumibles tales como alfombras, cables, o cualquier otro gas • No emisiones nocivas 	<ul style="list-style-type: none"> • Mejor uso de los materiales que permite una reducción de peso • Sólo un 2.5% de la energía necesaria para una soldadura láser • Una disminución en el consumo de combustible debido al uso de componentes más ligeros en las industrias aeronáutica, automotriz y naval

Sin embargo también presenta algunas limitaciones importantes a considerar, las cuales son (35):

- La velocidad de avance es más lenta que otras técnicas de soldadura convencionales por fusión.
- Las piezas de trabajo deben ser sujetadas rígidamente.
- Se requiere apoyo en los lados opuestos de las piezas de trabajo.
- Cuando la herramienta se retira queda un orificio de salida.

2.3.3 Aplicaciones

El FSW es un proceso en estado sólido que produce soldaduras de alta calidad en materiales difíciles de soldar tales como el aluminio y el magnesio, y rápidamente se está convirtiendo en el proceso de elección para la fabricación de estructuras de transporte de peso ligero tales como barcos, trenes y aviones (29).

La construcción naval y las industrias marinas son los dos primeros sectores que han adoptado este proceso para aplicaciones comerciales. El procedimiento es adecuado para la fabricación de paneles para cubiertas, costados, mamparas y suelos, cascos y superestructuras. Actualmente también es empleada en la industria aeroespacial, ya que el uso de FSW conduce a una reducción en partes, tiempos de ciclo reducidos, una mayor resistencia de la unión y menores costos de fabricación. Por otro lado, en la industria automotriz es un proceso muy atractivo ya que los fabricantes buscan una reducción en peso mediante la integración de aleaciones de aluminio y magnesio en sus montajes, así como una reducción de consumo de energía en el proceso de unión; este proceso se utiliza para crear casi todo, desde ejes de transmisión y tanques de combustible hasta los paneles de campana y enlaces de suspensión (29,32).

2.3.4 Soldabilidad de las aleaciones de aluminio mediante FSW

El FSW es un nuevo proceso de soldadura en estado sólido capaz de unir todas las aleaciones de aluminio, incluyendo las aleaciones de las series 2XXX y 7XXX que son más difíciles de soldar por métodos convencionales, las uniones por este método frecuentemente tienen propiedades más elevadas y se reducen significativamente problemas como la porosidad, grietas, formación compuestos intermetálicos de gran tamaño, entre otros, en comparación a los demás procesos de soldadura (30). Las microestructuras en las diferentes regiones de FSW en las aleaciones de aluminio se desarrollan de acuerdo al ciclo termomecánico y los

cambios en la microestructura se ven reflejados en la microdureza y otras propiedades mecánicas y de corrosión (34).


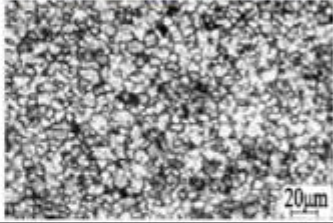
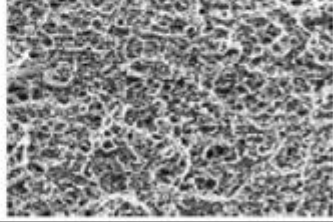
La aleación de aluminio comercial 1XXX presenta un comportamiento frágil bajo presión durante la soldadura debido a que la ductilidad y el porcentaje de elongación disminuyen, pero la microdureza en la unión y la zona afectada por el calor (ZAC) aumentan a medida que la presión de soldadura se incrementa. En algunos estudios se observó la evolución microestructural durante el proceso de FSW de las aleaciones de aluminio 2XXX (Al-Cu), encontrándose que hay una mejora en la dureza y resistencia al desgaste en comparación a los procesos de soldadura por fusión (29).

El FSW es un proceso viable para modificar la microestructura de la aleación A6XXX, después de la soldadura se puede observar en la unión una estructura de grano refinado y homogéneo con una buena resistencia. Actualmente la aleación A7XXX es la más empleada en industrias por su alta relación de resistencia-peso que la hace atractiva para usos estructurales en aviones (29).

Rajakumar y colaboradores (12) analizaron la influencia de los parámetros del proceso y de la herramienta en las propiedades de resistencia a la tensión de las uniones A7076-T6 producidas por la soldadura FSW. Para realizar las diferentes soldaduras mediante este proceso, variaron los parámetros de soldadura (carga axial, velocidad de avance y de rotación) y utilizaron diferentes herramientas no consumibles de acero de alto carbono.

Fueron observadas propiedades de resistencia más elevadas en la unión soldada con una velocidad de avance de 60 mm/min, velocidad de rotación de 1400 rpm y una carga axial de 8 kN con una herramienta de 15 mm de diámetro en el hombro, 5 mm de diámetro del pin y una dureza de 45 HRC (Tabla 2.17). Además se observaron que la zona de agitación se encontraba libre de defectos con una microestructura de grano fino y partículas de $MgZn_2$ uniformemente distribuidas provocando que la unión presente una alta resistencia a la tensión.

Tabla 2.17 Efecto de la velocidad de rotación sobre las propiedades de resistencia (vel. de soldadura = 60 mm/min, carga axial = 8 kN, diámetro del hombro = 15 mm, diámetro del pin = 5 mm y dureza de la herramienta = 45 HRC) (12).

Velocidad de rotación (rpm)	1400
Propiedades de resistencia	Resistencia a la fluencia= 314 MPa Resistencia a la tensión= 372 MPa Resistencia a la tensión con muesca= 397 MPa Dureza= 203 HV Eficiencia de la unión= 77%
Macrografía de la sección transversal de la unión	
Micrografía de la zona de soldadura	
Micrografía de la superficie de la fractura	
Observaciones	(i) Nombre del defecto: Libre de defectos (ii) Ubicación del defecto: Ninguno (iii) Causa del defecto: Suficiente entrada de calor (iv) Ubicación de la falla: ZATM (v) Promedio del diámetro del grano: 16.49µm (vi) Morfología de la fractura: Hoyuelos muy finos

2.3.5 Soldabilidad de las aleaciones de magnesio mediante FSW

Cuando se utilizan procesos de soldadura por fusión convencionales en las aleaciones de magnesio se producen algunos defectos como porosidad, agrietamiento en caliente y la formación de fases intermetálicas que deterioran las propiedades mecánicas en la unión. Para una soldadura libre de defectos, se requiere la eliminación completa de la capa de óxido en la superficie y la selección de unos parámetros adecuados (34,36). El proceso FSW es capaz de unir las aleaciones de magnesio sin fundirse, por lo tanto puede eliminar los problemas relacionados con la solidificación; también como en este proceso no se requiere ningún material de relleno, los problemas metalúrgicos asociados con ello pueden ser eliminados obteniendo una buena calidad en la soldadura (36).

Se han realizado investigaciones de uniones de aleaciones de magnesio mediante el FSW, y se ha observado que las regiones de la zona de agitación mostraron un tamaño de grano refinado sin presencia de intermetálicos de gran tamaño, esto lo atribuyeron a que éstos compuestos fueron disueltos o se rompieron por la interacción con la herramienta. La porosidad en la zona del material fundido fue cerrada como resultado del proceso de unión. También observaron que los granos en la zona de agitación muestran una alta densidad de dislocaciones y una textura preferencial con ciertos planos cristalográficos llamados planos basales alineados con la dirección de rotación de la herramienta (34).

Padmanaban y Balasubramanian (36) realizaron una investigación con el fin de entender el efecto de los parámetros del proceso FSW tales como la velocidad de rotación de la herramienta, la velocidad de avance de la soldadura y la carga axial sobre las propiedades de tensión en la aleación de magnesio AZ31B. Realizaron 14 uniones empleando diferentes niveles en los parámetros anteriormente mencionados evaluando las propiedades de tensión de las uniones soldadas y, las correlacionaron con la microestructura de la zona soldada y la dureza. A partir de esta investigación, se encontró que las uniones realizadas utilizando una velocidad

de rotación de la herramienta de 1600 rpm, una velocidad de soldadura de 0.67 mm/s y una carga axial de 3 kN obtuvieron propiedades de tensión superiores en comparación con las demás uniones (resistencia a la tensión de 208 MPa), debido a que hubo una generación de calor óptima produciendo una formación de granos más finos y una mayor dureza (78 Hv). Lo mencionado anteriormente, se puede observar en la Figura 2.8, la cual muestra una comparación del efecto que obtuvieron al emplear diferentes velocidades de avance en la soldadura. En las micrografías se observa una variación del diámetro promedio del grano en la región de la soldadura, ya que en el proceso FSW los granos de gran tamaño del metal son cambiados por granos más finos en la región de soldadura

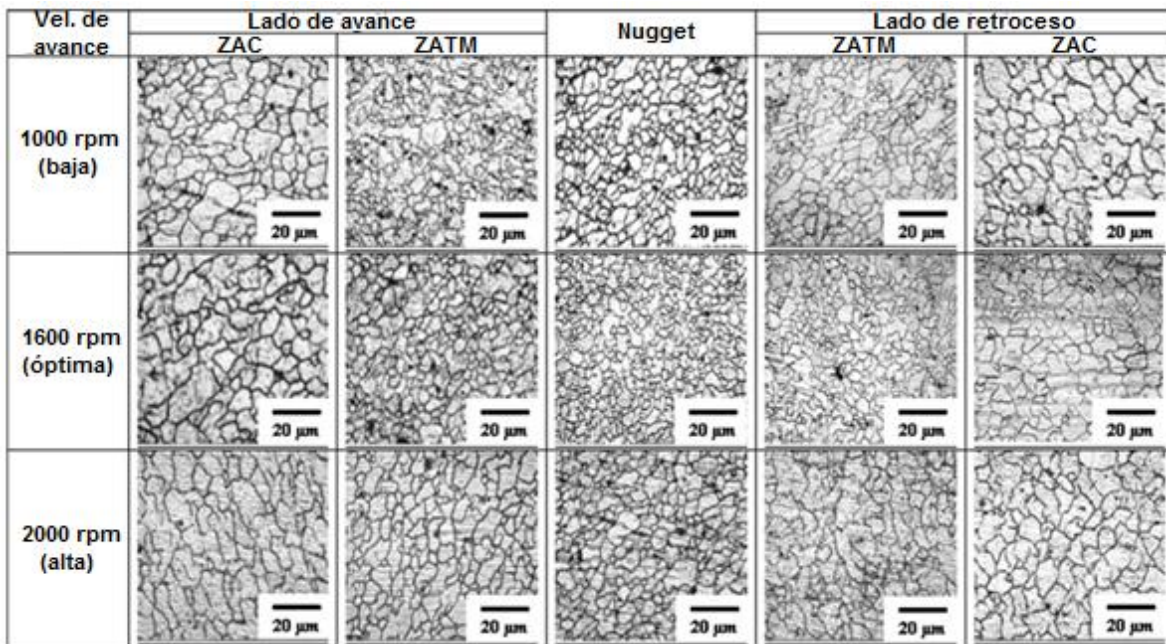


Figura 2.8 Efecto de la velocidad de avance en la microestructura (36).

2.3.6 Soldabilidad en uniones disímiles de aluminio y magnesio

La soldadura por fricción-agitación es un método de fabricación eficiente para unir aleaciones disímiles, reduciendo drásticamente los tamaños de grano y ofreciendo una elevada eficiencia en la unión mecánica. Mohammadi y colaboradores (2) realizaron un estudio sobre la unión disímil de las aleaciones AZ31B Y A6061 por medio del proceso FSW, utilizando una configuración de soldadura de traslape, en donde el AZ31B se encuentra sobre la aleación A6061, y la herramienta fue de acero grado herramienta H13 con un ángulo de inclinación de 3° , un hombro cóncavo y un pin en forma de rosca cónico. Las velocidades de rotación de la herramienta y del avance de la soldadura variaron entre 560-1400 rpm y 16-40 mm/min respectivamente. Observaron que la relación de 1400 rpm de velocidad de rotación y 40 mm/min de velocidad de soldadura se obtuvieron en las uniones soldadas una mayor resistencia en comparación a los materiales base, debido a la formación de compuestos intermetálicos (Figura 2.9 y Figura 2.10); éstos fueron observados mediante microscopía óptica y electrónica de barrido (MEB) en la interfaz de la unión; y se determinó que son de los siguientes tipos: a) $Al_{12}Mg_{17}$ (γ) combinado con la fase de Mg la cual se desplaza preferentemente a la superficie de la soldadura donde se encuentra la placa de Mg, y b) el compuesto intermetálico Al_3Mg_2 (β) que permaneció en la región inferior de la zona de agitación, cerca de la placa inferior de la placa de Al.

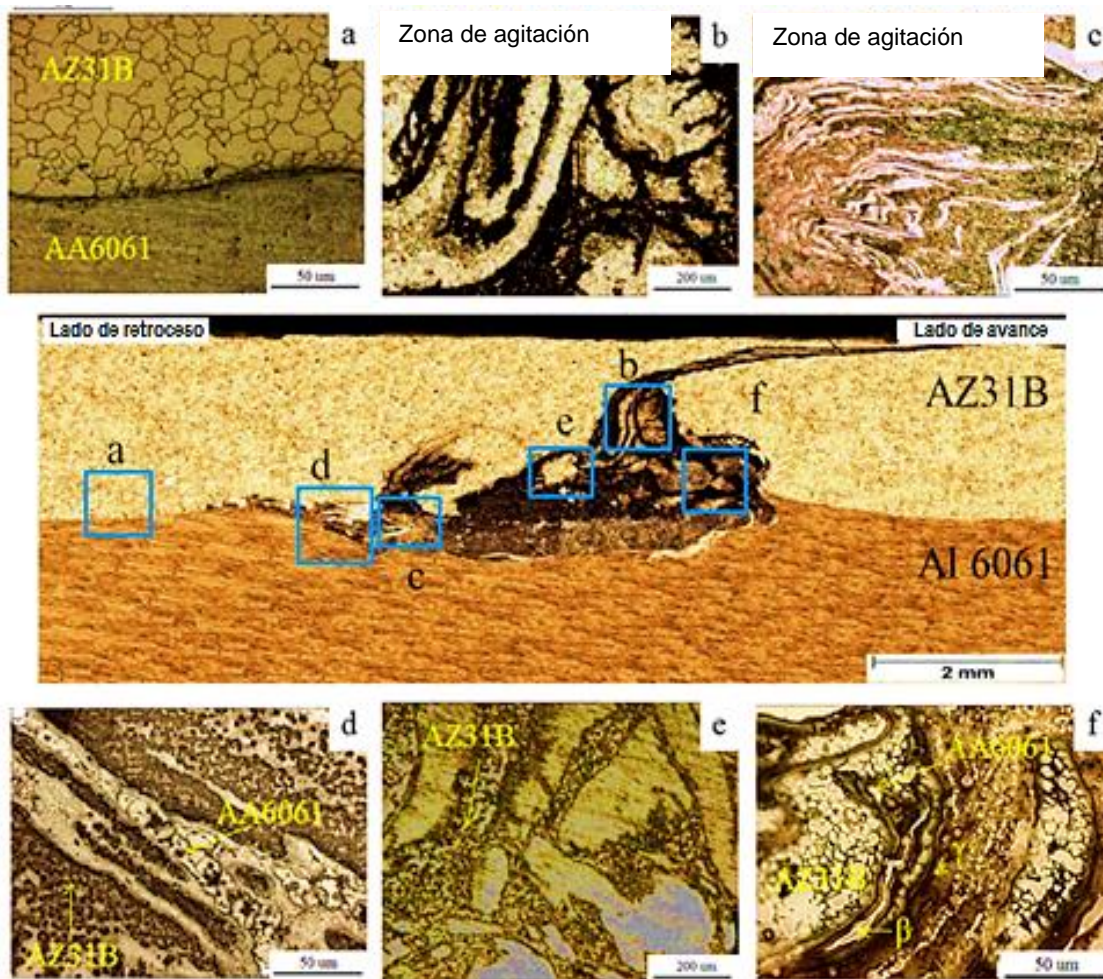


Figura 2.9 Sección transversal de las diferentes áreas de la unión a traslape de Mg-Al con una velocidad de rotación de 1400 rpm y velocidad de soldadura de 40 mm/min (2).

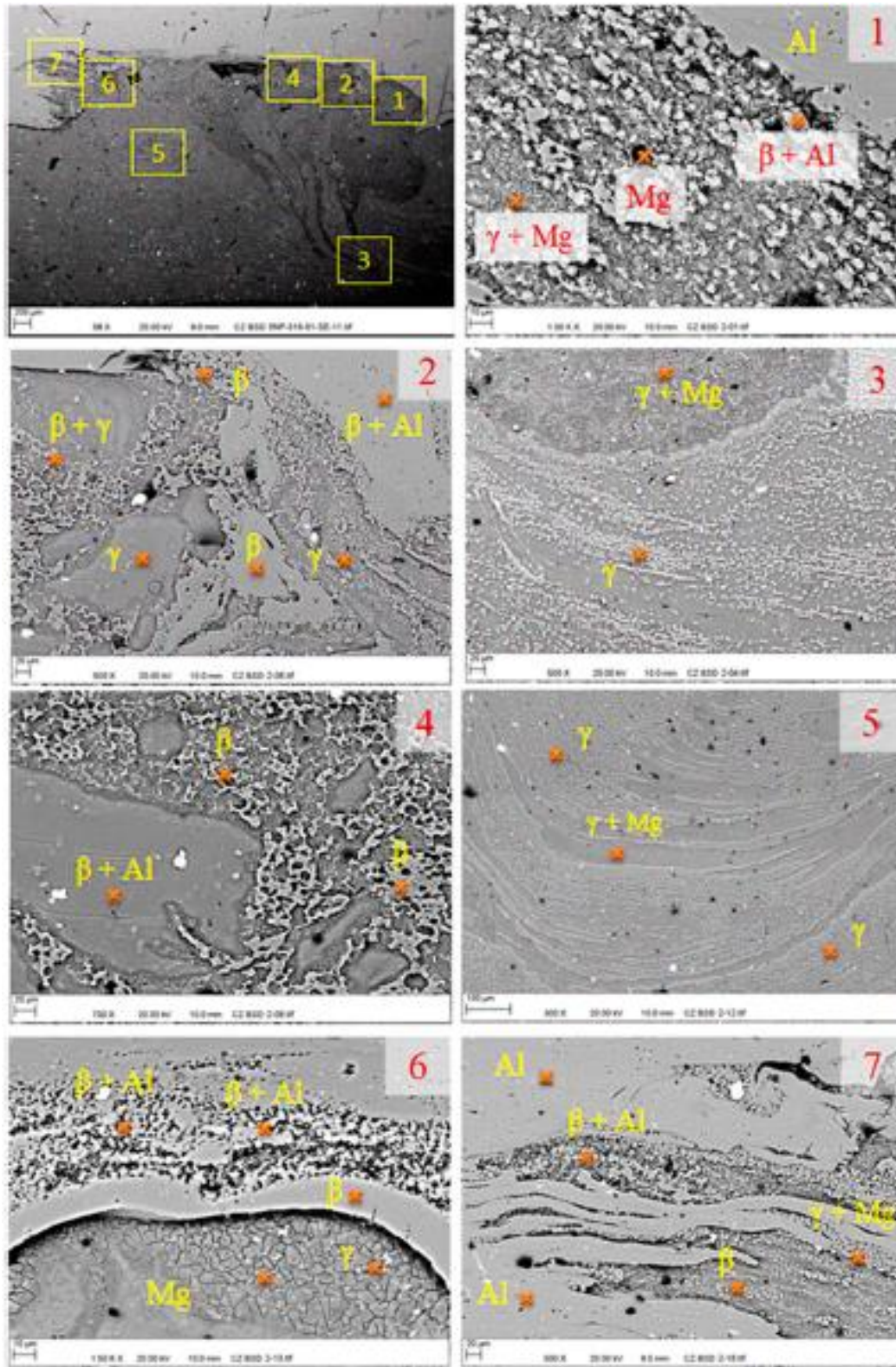


Figura 2.10 Micrografías mediante MEB de la sección transversal de diferentes áreas en la unión de Mg-Al con una relación de velocidad de rotación de 1400 rpm y una velocidad de soldadura de 40 mm/min (2).

Por último, se encontró que la formación de compuestos intermetálicos puede provocar un incremento en la microdureza como se observa en la Figura 2.11.

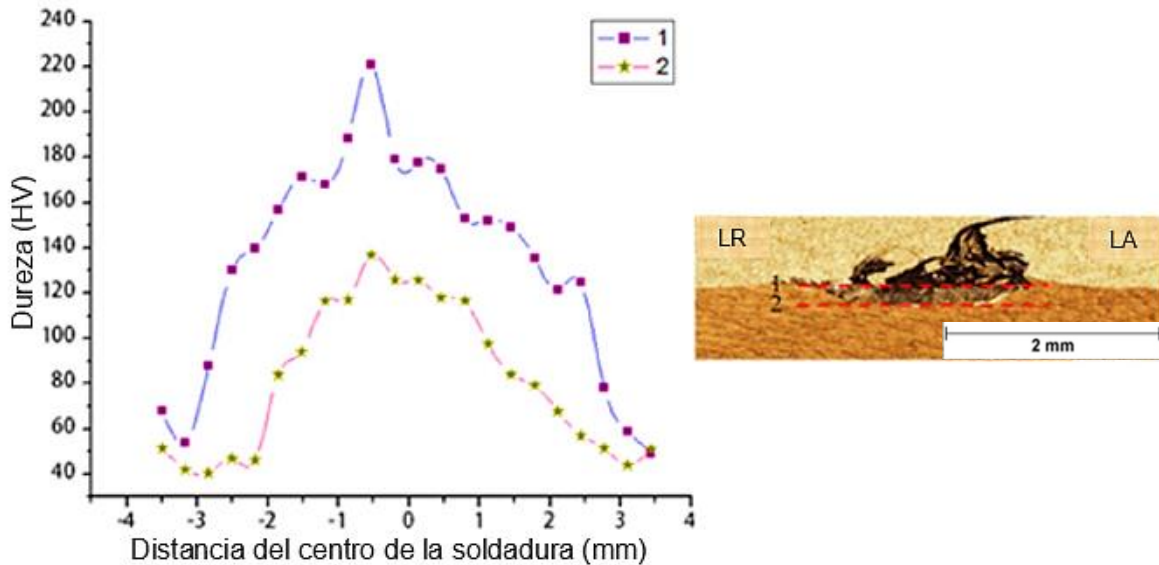


Figura 2.11 Perfil de dureza registrado a través de la sección transversal de la muestra soldada a una velocidad de rotación de 1400 rpm y una velocidad de soldadura de 40 mm/min (2).

En otro estudio que realizaron Dorbane y colaboradores (37) con las mismas aleaciones, A6061 y AZ31B, se analizó la microestructura, las propiedades mecánicas y de fractura de las uniones disímiles obtenidas por FSW al variar la velocidad de avance y de rotación de la herramienta. Las propiedades mecánicas y microestructurales de las soldaduras disímiles se evaluaron y correlacionaron con los parámetros del proceso de fricción-agitación con la finalidad de obtener las condiciones de soldadura óptimas. En este trabajo emplearon una herramienta con un diámetro de hombro de 10 mm con un pin en forma de rosca de 2.96 mm de altura y emplearon un ángulo de inclinación de 3°.

En la Figura 2.12 se presentan las imágenes por microscopía óptica de las uniones obtenidas con diferentes parámetros de soldadura; en general, se consiguieron soldaduras de buena calidad colocando al aluminio en el lado de avance, al colocar al aluminio en el lado de retroceso, se generaron algunos defectos como cavidades y una superficie descendiente en la soldadura.

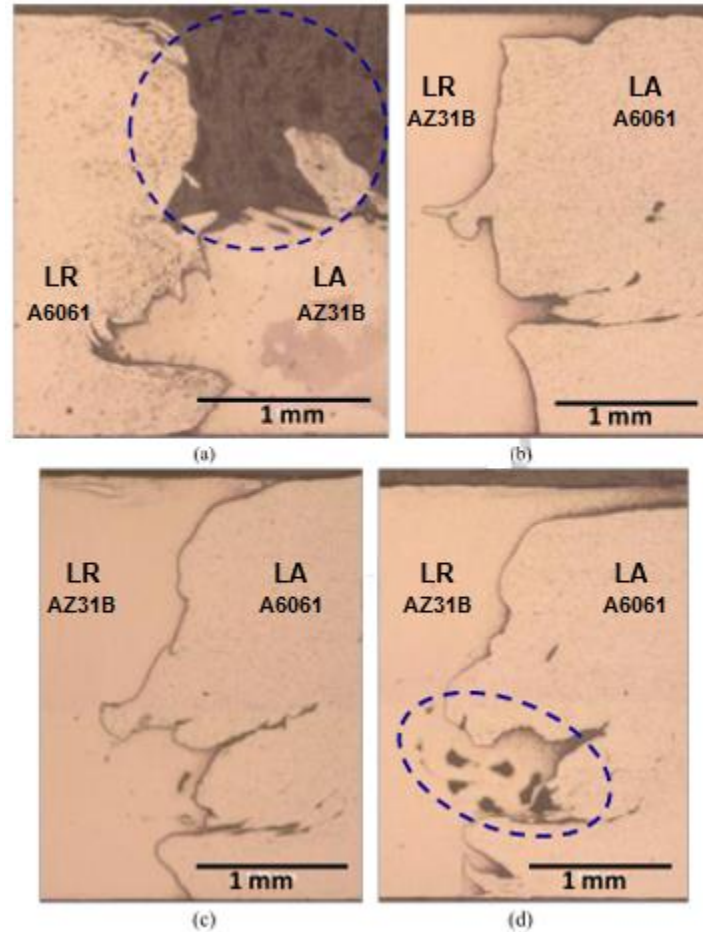


Figura 2.12 Imágenes mediante microscopía óptica de la sección transversal de la unión disímil obtenidas por los parámetros a) velocidad de rotación de la herramienta =1600 rpm y velocidad de avance = 250 mm/min, (b-d) velocidad de avance fija de 500 mm/min con velocidades de rotación de la herramienta variables de 1600, 1400, 1200 rpm respectivamente (37).

Las microestructuras de las diferentes zonas de las uniones disimilares de Al/Mg que se obtuvieron con los parámetros de soldadura de 1400 rpm y 500 mm/min se muestran en las Figura 2.13 y Figura 2.14. En éstas se observó que en la zona de agitación se presenta un refinamiento de grano considerable en comparación con el material base. La disminución del tamaño de grano lo correlacionaron a la deformación plástica severa encontrada en las aleaciones de aluminio y magnesio en la zona de agitación y también a la generación de calor, que ésta no fue suficiente para inducir el crecimiento de grano.

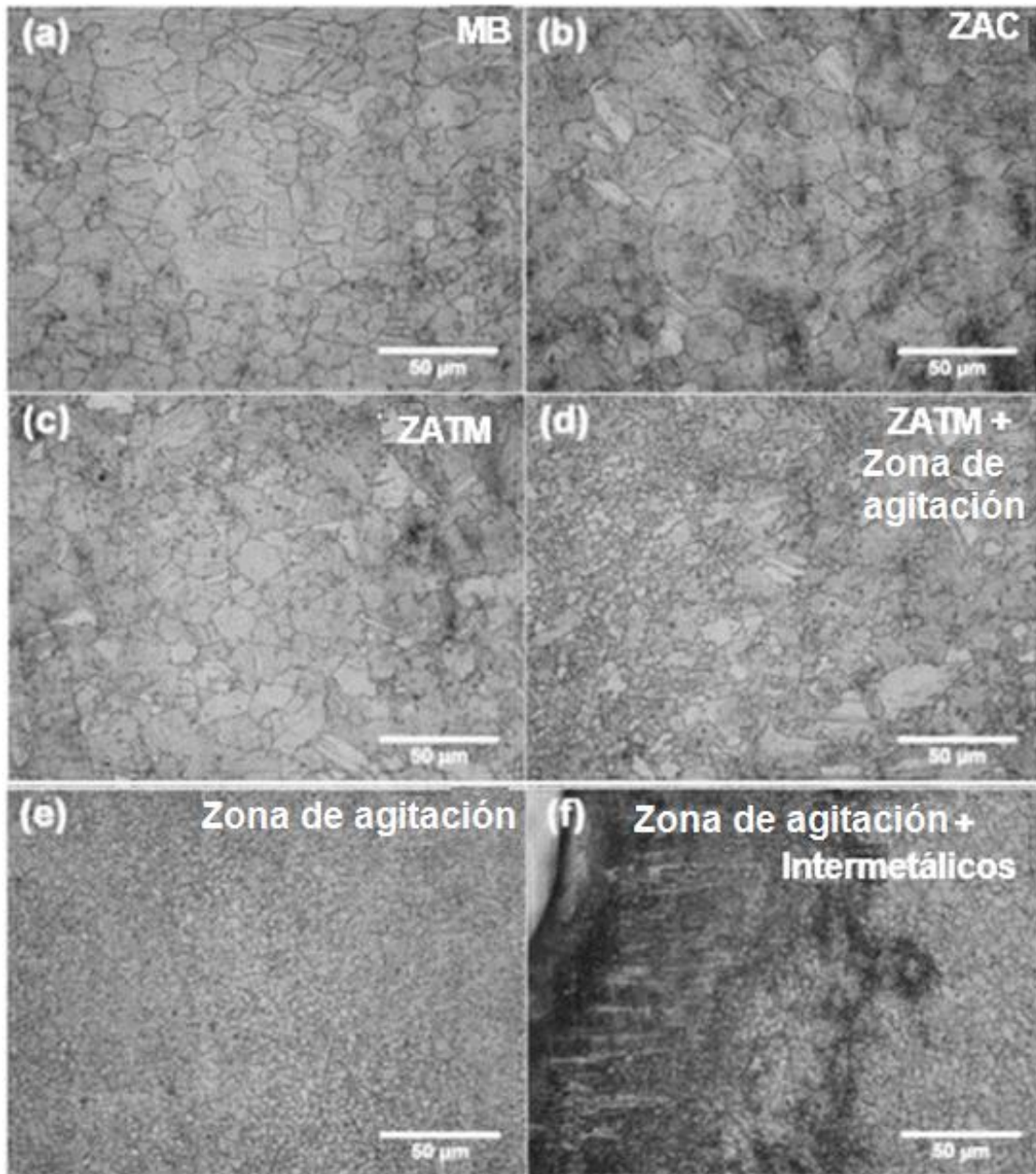


Figura 2.13 Microestructuras de las diferentes zonas del lado del magnesio en la unión disimilar de Al/Mg utilizando 1400 rpm y 500 mm/min (37).

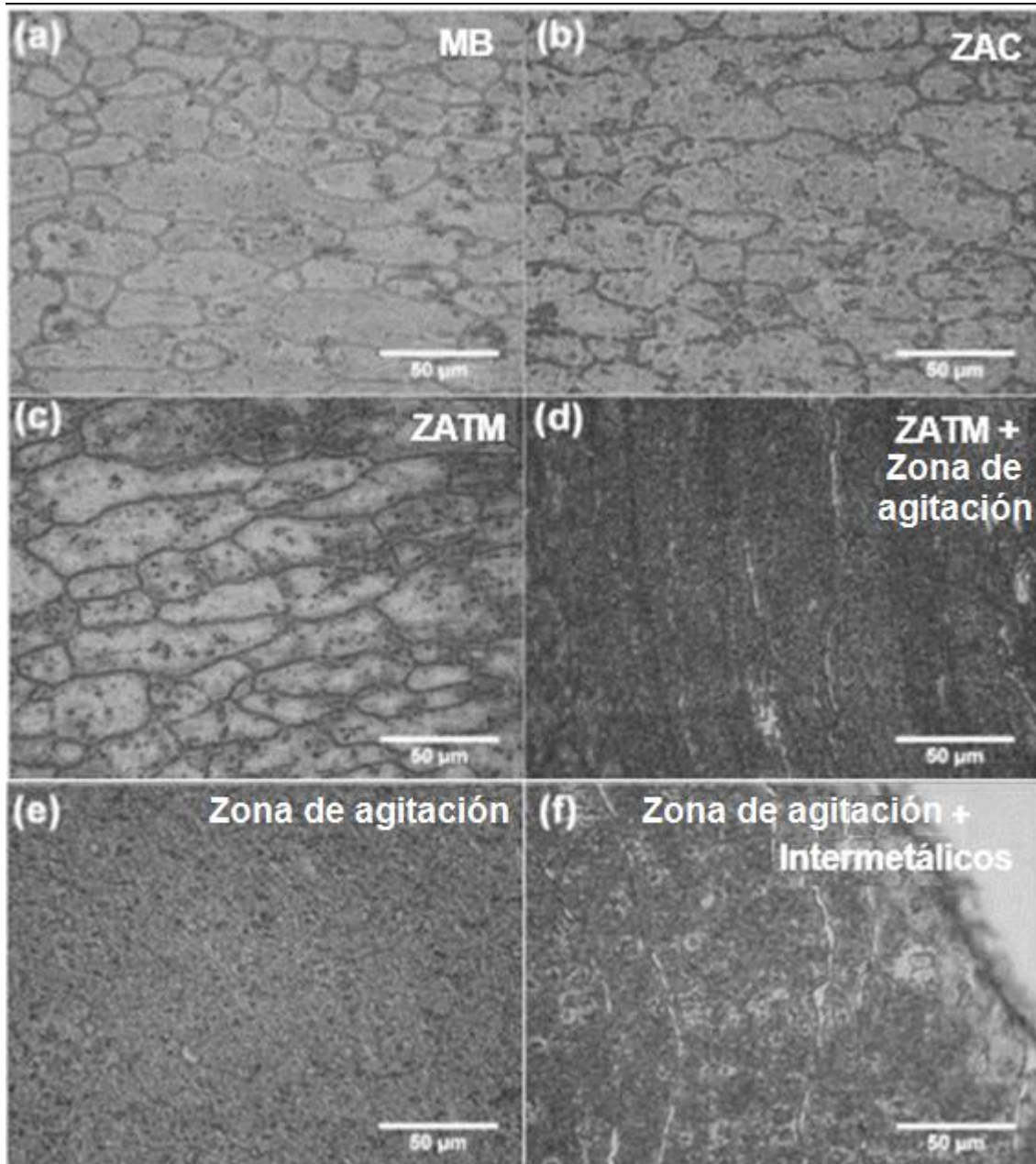


Figura 2.14 Microestructuras de las diferentes zonas del lado del aluminio en la unión disimilar de Al/Mg utilizando 1400 rpm y 500 mm/min (37).

En la Figura 2.15 se muestran las micrografías que obtuvieron estos autores por MEB mediante electrones secundarios de la unión al utilizar los parámetros de 1400 rpm y 500 mm/min. En las micrografías (Figura 2.15 (a) y (b)) se observan granos equiaxiales en la zona de agitación, en la Figura 2.15 (c) muestran que en la interface de Al y Mg es separada por una capa delgada de compuestos

intermetálicos ($\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ y Al_3Mg_2) y por último, en la Figura 2.15 (d) se observa que los precipitados presentes en la aleación de aluminio se rompieron en la zona de agitación, esto fue atribuido a la severa deformación en esa zona durante el proceso.

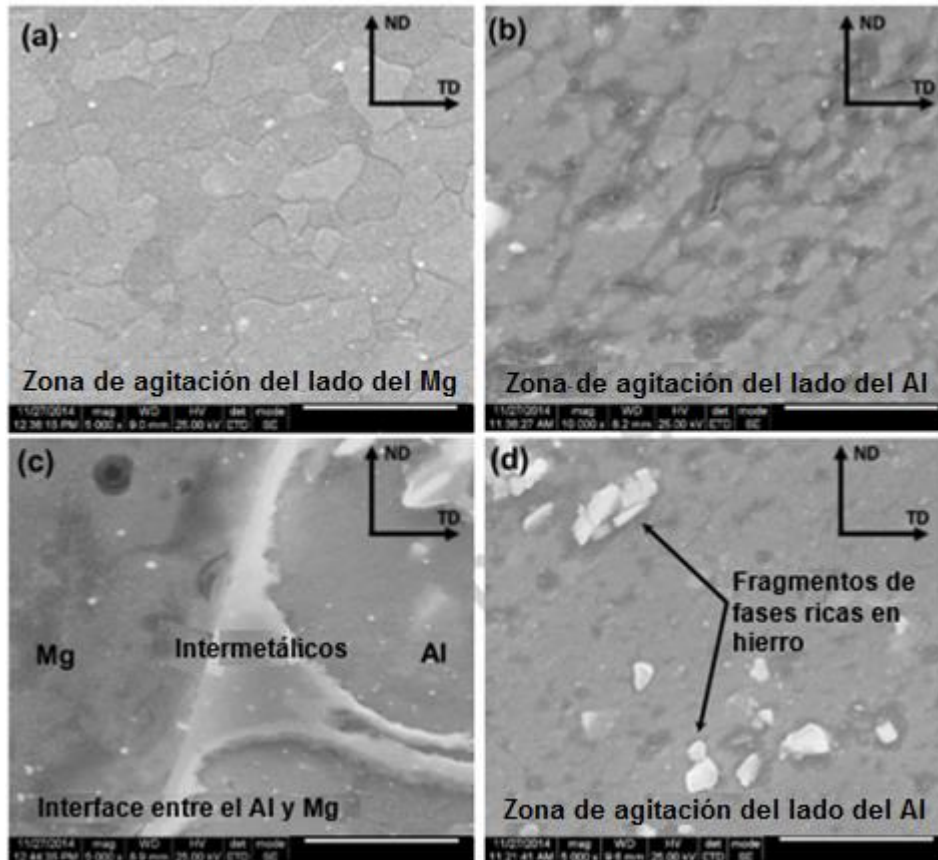


Figura 2.15 Análisis por MEB de la zona de agitación en una unión utilizando 1400 rpm y 500 mm/min a) zona de agitación del Mg, b) zona de agitación del Al, c) compuestos intermetálico en la interface entre Al y Mg y d) zona de agitación en el Al, precipitados fragmentados (37).

En cuanto a la evaluación de la microdureza, observaron que a lo largo de la sección de la unión se mostraron valores cambiantes en los materiales base (Al y Mg), se muestra también la presencia de los compuestos intermetálicos formados en este tipo de unión (Figura 2.16).

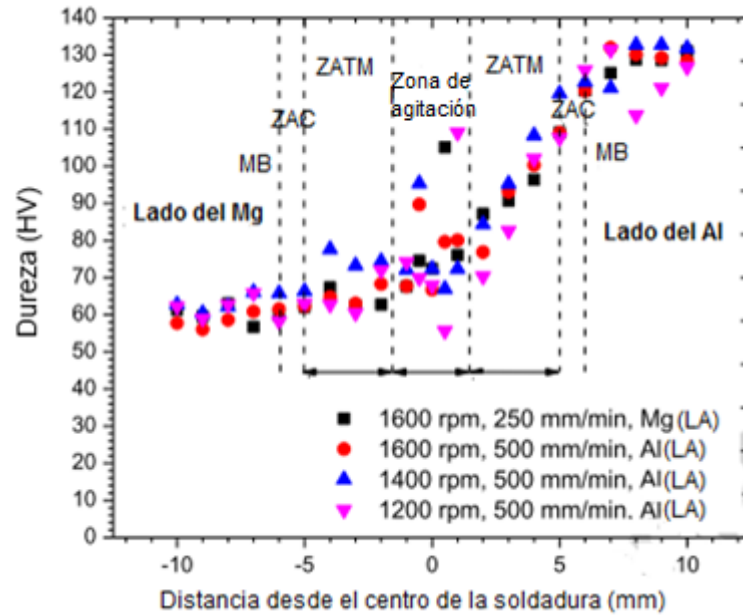


Figura 2.16 Microdurezas de las uniones disímiles de A6061/AZ31B (37).

Adicionalmente se realizaron ensayos de tensión, observando que la fractura de las muestras se produjo a lo largo de la unión soldada, donde los autores mencionan que la fractura pudo ser iniciada en los compuestos intermetálicos formados entre la interfaz del aluminio y magnesio (Figura 2.17). Estos resultados los correlacionaron con las observaciones de la Figura 2.16, en la cual se muestra la presencia de compuestos intermetálicos que provocan un incremento en los valores de microdureza. En la Figura 2.18 se observa que la unión presenta una fractura de comportamiento frágil y en la región ampliada de la zona superior de la superficie fracturada, muestra la presencia de compuestos intermetálicos (flechas).

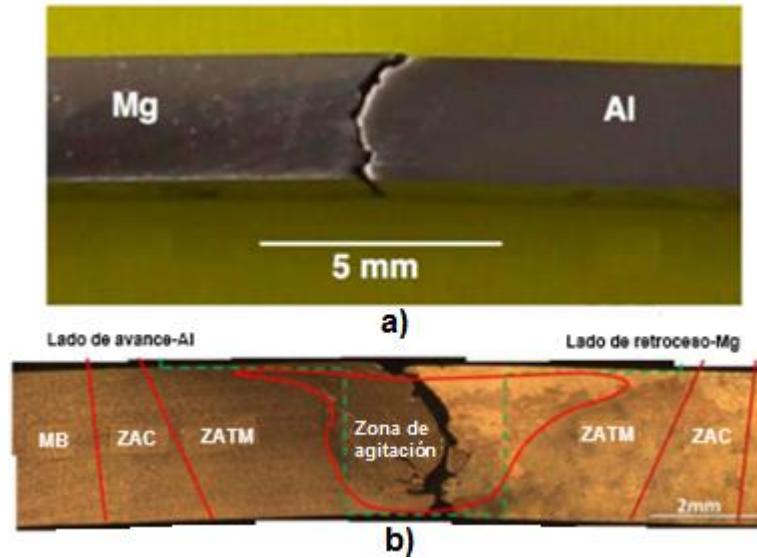


Figura 2.17 Unión soldada con 1400 rpm y 500 mm/min fracturada después de la carga de tensión, a) macrografía, b) muestra observada con el microscopio óptico (37).

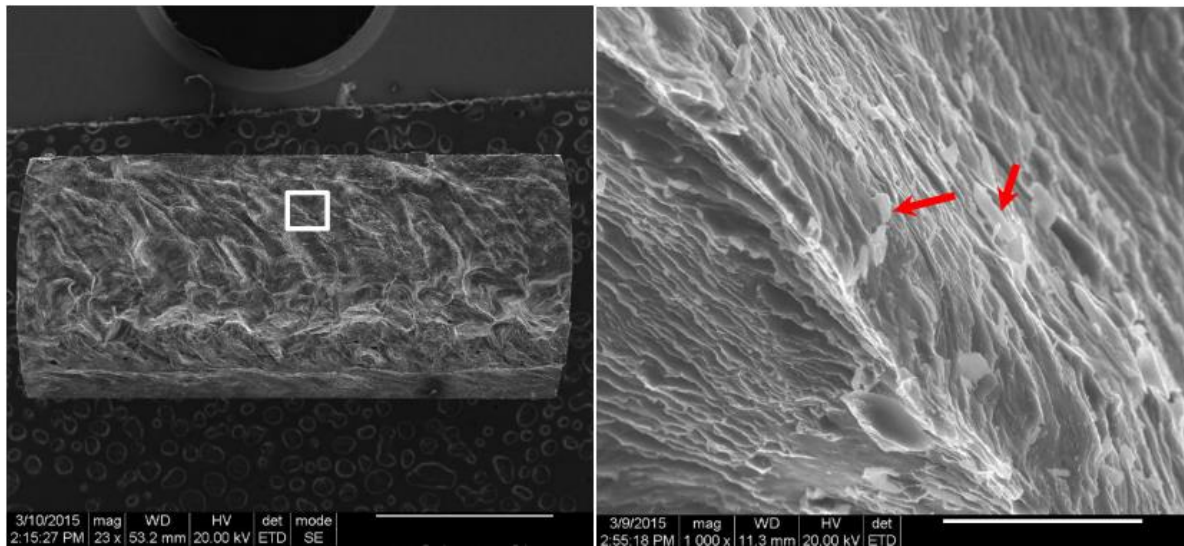


Figura 2.18 Fractografía mediante MEB de la muestra soldada con 1400 rpm y 500 mm/min a temperatura ambiente (37).

Por otra parte, Li y colaboradores (4) analizaron la microestructura y la calidad de las uniones por fricción-agitación de las aleaciones A7075 y AZ31B con diferentes parámetros de soldadura. Durante el proceso de soldadura FSW, se empleó una inclinación de la herramienta de 2° , una velocidad de rotación de la herramienta de 780 rpm, una velocidad de soldadura de 30 mm/min, una longitud del pin de 3.8 mm y una reducción de 0.2 mm. Se observó en la zona de soldadura (Figura 2.19) una recristalización dinámica y, granos equiaxiales debido a una elevada generación de calor y de deformación; se puede apreciar que las aleaciones de Al y Mg están entrelazadas entre sí mostrando una estructura típica de remolino, también aparecen los compuestos intermetálicos frágiles de $Al_{12}Mg_{17}$ y Al_3Mg_2 causando un incremento en la microdureza en la zona de agitación y una disminución en la resistencia a la tensión (Figura 2.20 y Figura 2.21).

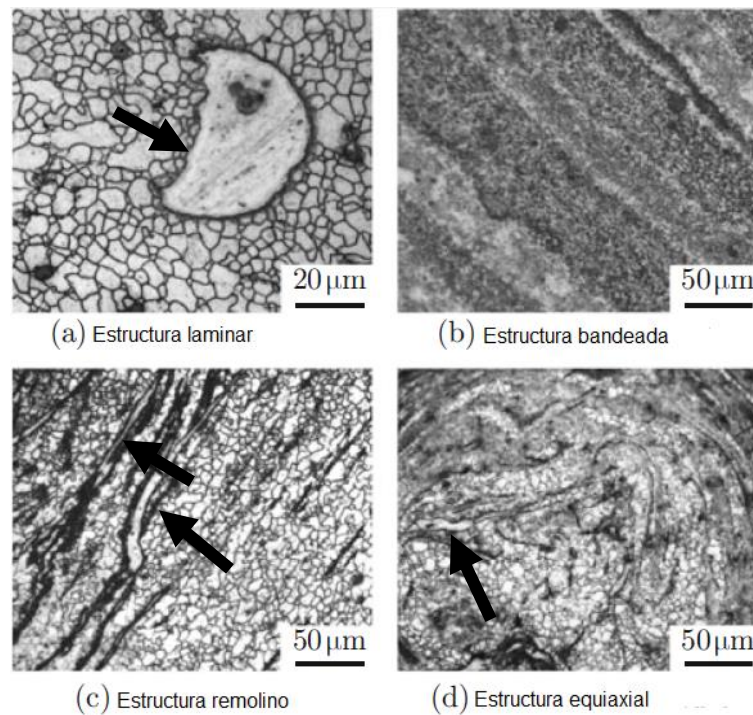


Figura 2.19 Microestructuras de las diferentes regiones de la zona FSW (4)

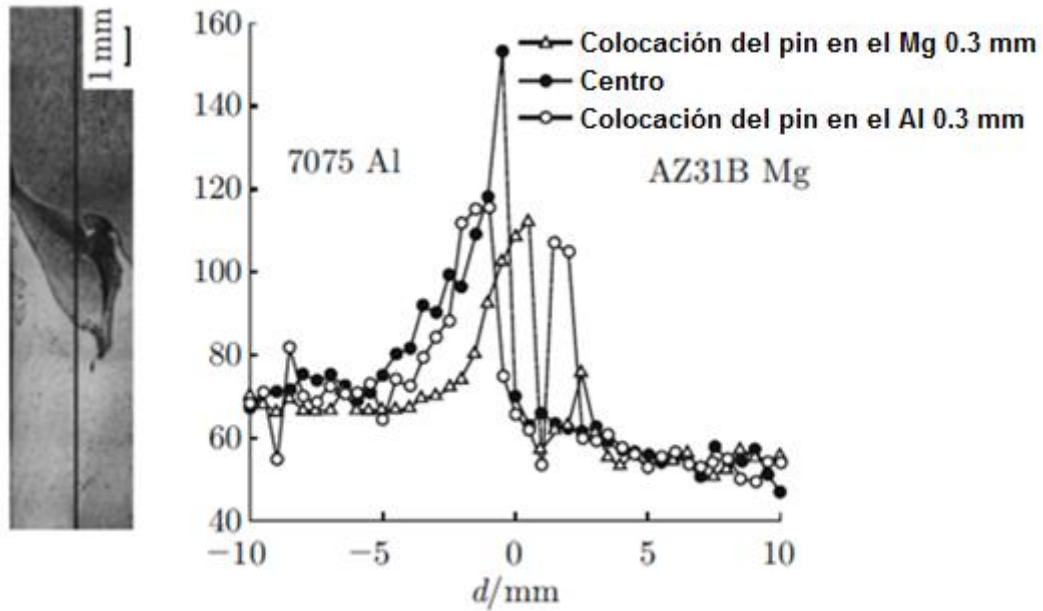


Figura 2.20 Curvas de dureza de las diferentes muestras (4)

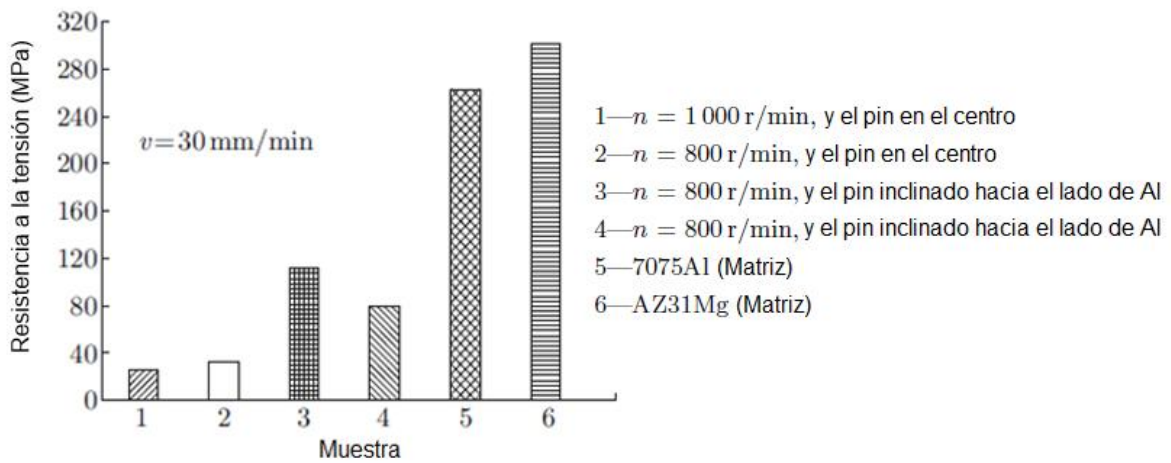


Figura 2.21 Esfuerzo de tensión en la zona soldada (4)

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA

Actualmente las aleaciones ligeras tales como, aleaciones de aluminio y magnesio son ampliamente utilizadas en la industria automotriz y aeroespacial debido a la excelente combinación de bajo peso (promoviendo que exista un ahorro sustancial en el uso de combustible cuyo efecto se traduciría en la reducción de las emisiones de CO₂) y elevada resistencia, la cual es obtenida al alear estos materiales con otros elementos o aplicándoles algún tratamiento térmico. El empleo de ambas aleaciones ofrece una mayor flexibilidad de diseño; sin embargo, para promover la fabricación e integración de piezas elaboradas con este tipo de materiales es necesario contar con un proceso de unión confiable, debido a que los procesos de soldadura convencionales por fusión propician la aparición de defectos relacionados con la solidificación; por lo que se ha optado por un proceso de soldadura en estado sólido, como el proceso de soldadura por fricción agitación.

Durante la revisión bibliográfica, se han encontrado algunos trabajos relacionados a la unión de aleaciones de aluminio y magnesio, y de uniones disímiles de éstas mediante el proceso FSW. En la mayoría de ellos, se realiza un estudio sobre el efecto que tienen los parámetros en la soldadura, indicando los parámetros óptimos para obtener uniones de buena calidad.

Aunque la soldadura por fricción-agitación es un proceso en estado sólido, existe una generación de calor provocada por la herramienta, cuyo objetivo es llevar a un estado plástico al material para lograr la unión; para ello se deben emplear los parámetros óptimos para tener una eficiente entrada de calor y así obtener una soldadura libre de defectos con un tamaño de grano refinado, propiciando excelentes propiedades mecánicas en la unión soldada. El tamaño de grano también es influenciado por la deformación plástica, al tener una deformación severa se obtiene un tamaño de grano más pequeño.

Se ha reportado en la literatura la formación de dos compuestos intermetálicos en específico, el $Al_{12}Mg_{17}$ y Al_3Mg_2 en la zona de agitación causando una mayor dureza en esta zona y disminuyendo algunas propiedades en la unión.

Dentro del análisis bibliográfico se ha encontrado que existe una influencia de la posición (lado de avance o retroceso) en dónde se coloque el material al realizar la unión por este proceso, es decir, al posicionar a la aleación de magnesio en el lado de avance, se produce una serie de defectos y una pobre unión de los materiales; sin embargo, se obtienen mejores soldaduras al colocar a la aleación de aluminio en el lado de avance.

Es importante mencionar que existe aún muy poca información respecto a la unión disímil de las aleaciones A7075-T6/AZ31B en comparación de la unión A6061-T6/AZ31B, ya que, el único estudio que se logró obtener de esta aleación no brinda información suficiente.

Por último, en la Tabla 3.1 se muestra un resumen sobre algunos estudios encontrados en la literatura referente a aleaciones ligeras (A7075-T6 y AZ31B) y uniones dísimiles de Al/Mg soldadas mediante el proceso de fricción-agitación.

Tabla 3.1 Resumen de estudios encontrados en la literatura de aleaciones ligeras (A7075-T6 y AZ31B) y uniones dísimiles de Al/Mg soldadas mediante el proceso FSW.

Estudio	Material	Parámetros	Conclusiones
S. Rajakumar, C. Muralidharan, V. Balasubramanian (2011); (12)	A7075-T6	Espesor= 5 mm Vel. de rotación= 900 - 1800 rpm Vel. de avance= 20 - 100 mm/min Carga axial= 6 - 10 kN Herramienta de acero de alto carbono Diámetro del hombro= 9 - 21 mm Diámetro del pin= 3 - 7 mm Dureza de la herramienta= 33 - 56 HRC	1.- La unión fabricada utilizando los parámetros del proceso FSW de 1400 rpm, 60 mm/min, 8kN, con los parámetros de la herramienta de 15 mm (diámetro del hombro), 5 mm (diámetro del pin) y una dureza de 45 HRC, se obtuvieron propiedades de resistencia más elevadas. 2.- La zona de agitación se encuentra libre de defectos con una microestructura de grano fino y partículas finas de MgZn ₂ uniformemente distribuidas.
G. Padmanaban, V. Balasubramanian (2010); (36)	AZ31B	Espesor= 5 mm Vel. de rotación= 1000 - 2000 pm Vel. de avance= 0.37 - 2.25 mm/s Carga axial= 2 - 4 kN Herramienta de acero de alto carbono Diámetro del hombro=18 mm Diámetro del pin= 6 mm Dureza de la herramienta= 70 HRC	1.- La aleación AZ31B se unió con éxito sin ningún defecto de nivel macro mediante el proceso FSW empleando el rango de parámetros. 2.- La unión realizada con una vel. de rotación de 1600 rpm, vel. de avance de 0.67 mm/s y una carga axial de 3 kN, mostró propiedades de tensión más elevadas.
J. Mohammadi, Y. Behnamian, A. Mostafaei, H. Izadi, T. Saeid, A. H. Kokabi, A. P. Gerlich (2015); (2)	AZ31B/A6061 Unión de traslape	Espesor de AZ31B= 3.1 mm Espesor de A6061= 2.3 mm Vel. de rotación= 560 - 1400 rpm Vel. de avance=16 - 40 mm/min Herramienta de acero H13 Diámetro del hombro=18 mm Diámetro del pin=5 a 6 mm	1.- Con la relación de 1400 rpm de vel. de rotación y 40 mm/min de vel. de avance se obtuvieron en las uniones soldadas una mayor resistencia en comparación a los materiales base, debido a la formación de compuestos intermetálicos 2.- Se observaron dos diferentes tipos de microestructura en la zona soldada: Al ₁₂ Mg ₁₇ (γ) y Al ₃ Mg ₂ (β) 3.- Mediciones de microdureza indican que la formación de compuestos intermetálicos resultó en un mayor valor de dureza.
A. Dorbane, B. Mansoor, G. Ayoub, V. C. Shunmugasamy, A. Imad (2015); (37)	AZ31B/A6061 Ambos materiales en cualquier lado (LA, LR)	Espesores= 3mm Vel. de rotación= 1600, 1400, 1200 rpm Vel. de avance= 250 y 500 mm/min Inclinación de la herramienta: 3° Longitud del pin= 2.96 mm Diámetro del pin: 3.6 a 2.9 mm	1.- Se consiguieron soldaduras de buena calidad colocando a la aleación de aluminio en el lado de avance. 2.- Obtuvieron una calidad óptima de la unión empleando 1400 rpm y 500 mm/min. 3.- En la zona de agitación hay un refinamiento de grano. 4.- Fue observada una fina capa de compuestos intermetálicos (Al ₁₂ Mg ₁₇ y Al ₃ Mg ₂) entre la interfaz de la unión, obteniendo algunos picos elevados en la microdureza. 5.- En los ensayos de tensión se observó que las uniones presentaron un comportamiento frágil.
D. Li, Z. Cui, Q. Yang, B. Sun, M. Sun (2012); (4)	AZ31B/A7075 LA= AZ31B LR= A7075	Espesores= 4mm Vel. de rotación=13 r/s Vel. de avance=30 mm/min Inclinación de la herramienta: 2° Longitud del pin= 3.8 mm Reducción de 0.2 mm	1.- Los compuestos intermetálicos frágiles Al ₁₂ Mg ₁₇ y Al ₃ Mg ₂ aparecen en la unión soldada de 7075Al y AZ31BMg, que causan el aumento de la microdureza y una disminución en el esfuerzo de tensión.

CAPÍTULO 4 CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio para este trabajo consiste en el análisis del comportamiento mecánico y microestructural de uniones disímiles de aleaciones de aluminio A6061-T6 y A7075-T6 con la aleación de magnesio AZ31B soldadas mediante el proceso de soldadura por fricción-agitación.

4.1 Metodología

Las actividades que se realizaron para este caso de estudio se muestran en la Figura 4.1, después de la recepción del material se llevó a cabo la preparación de las placas para unir las diferentes aleaciones mediante el proceso FSW.

Una vez realizadas las uniones disímiles de Al/Mg, se prepararon las probetas para su caracterización por microscopía óptica (MO) realizando un corte transversal de la soldadura, posteriormente se montaron en baquelita para efectuar el desbaste y pulido de las muestras.

El maquinado de las probetas para el ensayo de tensión se realizó de acuerdo al código AWS D1 para la evaluación de sus propiedades mecánicas, finalmente se registraron los resultados obtenidos.

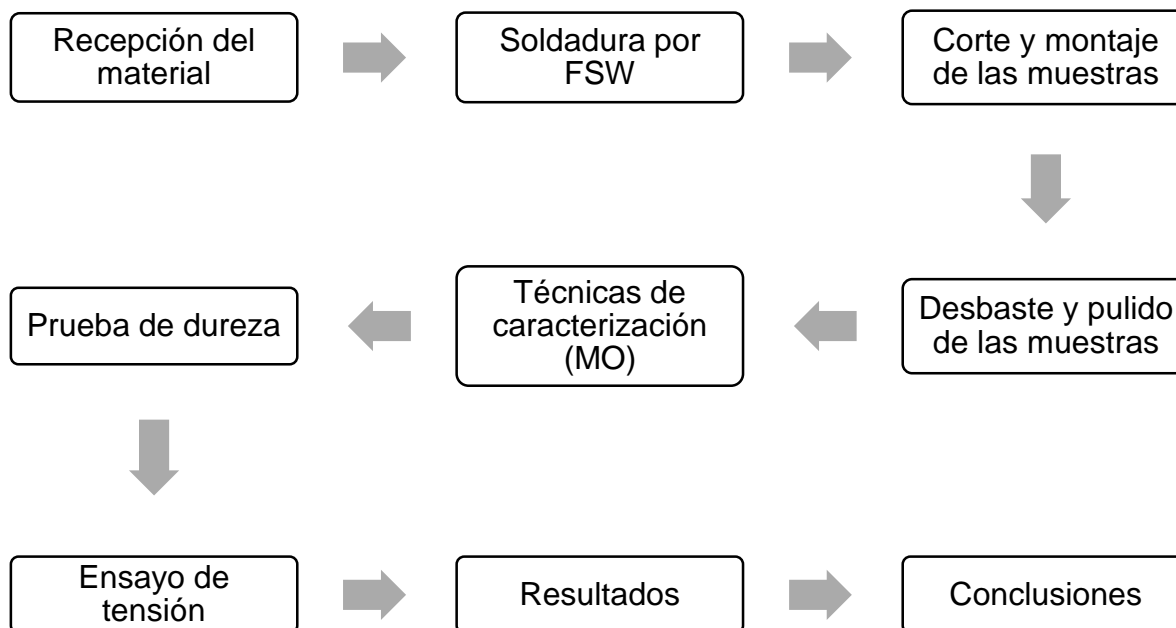


Figura 4.1 Diagrama de la metodología experimental empleada para este caso de estudio.

4.2 Materiales

Se empleó como material de estudio a las aleaciones de aluminio A6061-T6 y A7075-T6 y la aleación de magnesio AZ31B, la composición química se muestra en las Tabla 4.1, Tabla 4.2 y Tabla 4.3 respectivamente. Las dimensiones de las placas fueron de 150 x 60 x 6 mm.

Tabla 4.1 Composición química de la aleación A6061-T6.

Composición % e.p							
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.593	0.497	0.237	0.152	0.928	0.139	0.047	0.09

Tabla 4.2 Composición química de la aleación A7075-T6.

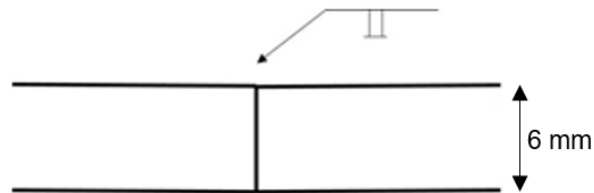
Composición % e.p							
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.09	0.24	1.93	0.03	2.13	0.21	5.31	0.02

Tabla 4.3 Composición química de la aleación AZ31B.

Composición % e.p						
Al	Mn	Zn	Fe	Sn	Si	Cu
2.55	0.31	0.79	0.041	0.008	0.008	0.002

4.3 Soldadura por FSW

Las placas de las aleaciones se prepararon para ser soldadas en una junta a tope mediante el proceso FSW como se puede observar en la Figura 4.2 y Figura 4.3 con el apoyo de la Asociación de Investigación Metalúrgica del Noreste (AIMEN).

**Figura 4.2** Diseño de la junta para la unión disímil de Al/Mg mediante FSW**Figura 4.3** Equipo STIR PDS Intelligent Stir Welding MTS

En este caso de estudio, se utilizó una herramienta de soldadura fabricada con un acero grado herramienta H13 y se encuentra provista de un pin constituido de material MP159, cuyas dimensiones de altura y diámetro son de 6 mm y 5.08 mm, respectivamente.

Asimismo, los parámetros empleados para estas uniones disímiles se indican en la Tabla 4.4. Es importante mencionar que se utilizaron diferentes parámetros de soldadura, sin embargo, en el presente trabajo sólo se muestran las soldaduras en las que se obtuvo la unión correcta de ambos materiales, Al/Mg.

Tabla 4.4 Parámetros de soldadura utilizados para la unión disímil de las aleaciones A6061-T6/AZ31B y A7075-T6/AZ31B.

<i>UNIÓN DISÍMIL A6061-T6/AZ31B</i>					
Muestras	V_{Rotación} (rpm)	V_{Avance} (mm/min)	Offset en el Mg (mm)	Lado de avance	Ángulo
Muestra 1	1200	30	1	Al	3°
Muestra 2	400	30	0	Al	1°
<i>UNIÓN DISÍMIL A7075-T6/AZ31B</i>					
Muestras	V_{Rotación} (rpm)	V_{Avance} (mm/min)	Offset en el Mg	Lado de avance	Ángulo
Muestra 3	200	30	0	Al	1°

En la Figura 4.4 se puede observar con una mejor claridad la posición del offset en la aleación de magnesio AZ31B y los ángulos de inclinación que se emplearon para la herramienta, con la finalidad de que existiera un mejor desplazamiento del material.

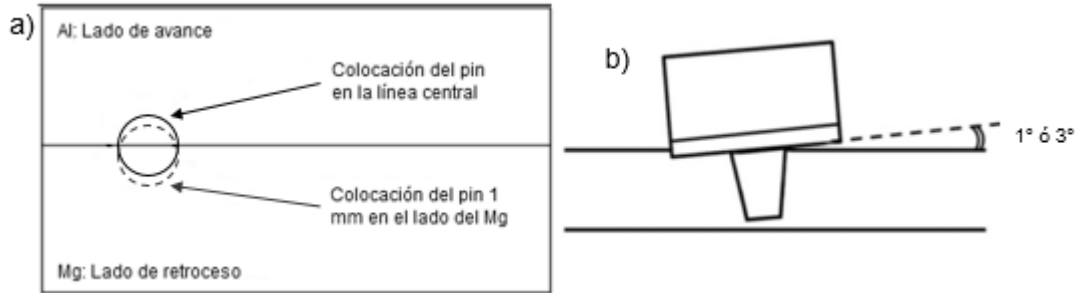


Figura 4.4 a) Colocación del pin 1 mm en el lado del magnesio (Offset), b) Ángulo de inclinación entre la superficie de la soldadura y la herramienta de FSW.

4.4 Técnicas de caracterización

La preparación metalográfica de las muestras, inició con el desbaste de las mismas mediante papel abrasivo de SiC de diferente granulometría (500, 800 y 1200), posteriormente se pulieron utilizando solamente pasta de diamante (3, 1 y $0.25 \mu\text{m}$) y finalmente se realizaron dos ataques químicos con la finalidad de observar la microestructura y defectos presentes en las uniones disímiles después de haber sido soldadas por el proceso FSW. El primer ataque consistió en una solución de 10 ml de ácido acético, 10 ml de agua destilada y 4.2g de ácido pícrico en 100 ml de etanol para revelar la microestructura de las regiones de la aleación AZ31B, el segundo ataque fue mediante el reactivo Keller's para la microestructura de las regiones de aluminio (A6061-T6 y 7075-T6).

Se utilizó la microscopía óptica (MO) como parte de una de las técnicas de caracterización, para ello se empleó un microscopio Nikon Eclipse MA 200, en el que se analizaron las muestras con diferentes magnificaciones. Se obtuvieron macrográficas de las muestras mediante un estereoscopio marca Nikon SMZ 7457.

4.4.1 Resultados

En la Figura 4.5 se muestra la microestructura de la aleación A6061-T6, donde es posible observar la presencia de precipitados conocidos como siliciuros de magnesio (Mg_2Si) así como la forma y el límite de los granos en la matriz de aluminio.



Figura 4.5 Micrografía de la aleación A6061-T6

La microestructura de la aleación A7075-T6 se muestra en la Figura 4.6, observándose la presencia de precipitados de $MgZn_2$ y granos alargados.

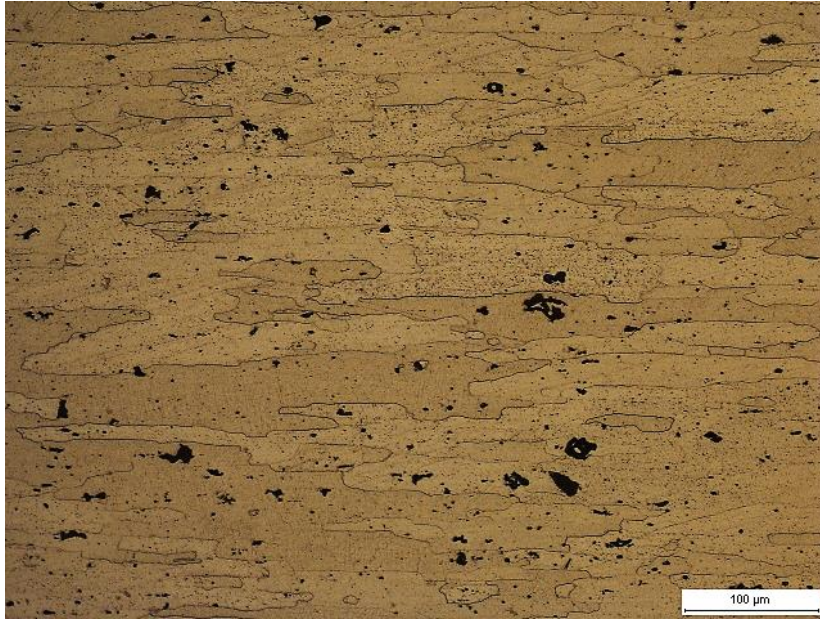


Figura 4.6 Micrografía de la aleación A7075-T6.

Por último, en la Figura 4.7 se puede apreciar la microestructura de la aleación AZ31B, en la cual es posible observar partículas de Mn-Al así como la forma y el límite de los granos en una matriz de magnesio.

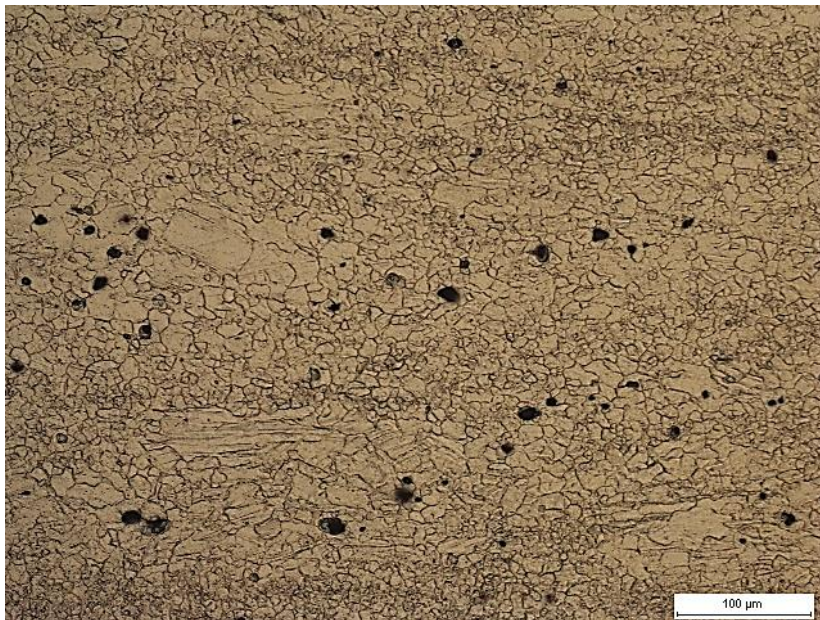


Figura 4.7 Micrografía de la aleación AZ31B.

En la *Muestra 1* (Figura 4.8) se observa que existe una mezcla completa de ambos componentes pero se logra percibir que existe una falta de penetración en la unión que pudo ser a causa de una insuficiente generación de calor durante la soldadura o debido a que la penetración de la herramienta se controló por medio de la posición en el que pueden encontrarse algunas inexactitudes, este tipo de defecto también se encontró en las demás uniones. En la *Muestra 2* (Figura 4.10) y en la *Muestra 3* (Figura 4.12) se observa que el aluminio (lado de avance) es desplazado hacia la aleación AZ31B (lado de retroceso) por acción de la herramienta, se aprecia una mezcla más severa en el lado de avance, pero en la *Muestra 3* (Figura 4.12) se aprecian claramente algunos defectos que se pueden presentar en este proceso de soldadura como cavidades y túneles de gusano (wormhole).

En las Figura 4.9 (*Muestra 1*), Figura 4.11 (*Muestra 2*) y Figura 4.13 (*Muestra 3*) se muestran las micrografías obtenidas de la zona de unión. De acuerdo con la literatura (2,4,37) revisada sobre este tipo de uniones disímiles realizadas mediante el proceso de soldadura por fricción-agitación, se menciona que existe una formación de compuestos intermetálicos ($Al_{12}Mg_{17}$ y Al_3Mg_2), por lo que probablemente estos compuestos pueden estar presentes en las tres soldaduras que se realizaron. En las micrografías de las diferentes uniones se observa que en la zona de agitación se encuentra material de aluminio y magnesio.

Se observó un refinamiento de grano en la ZATM del lado de avance (aleación de aluminio), ya que el número de tamaño de grano en esta zona es de $8^{1/2} - 9$ ASTM y en el metal base es de 2 ASTM.

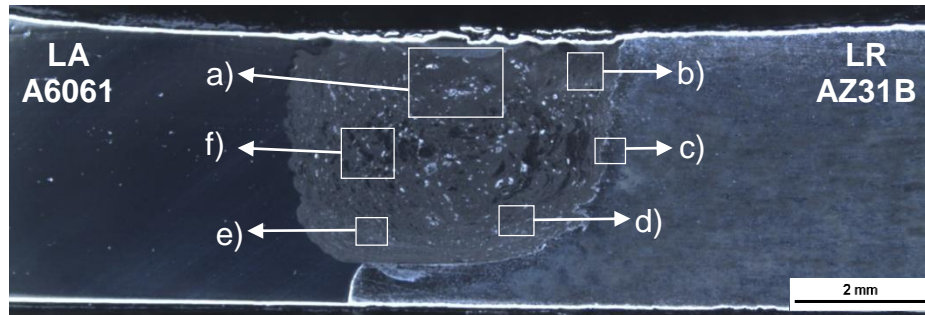


Figura 4.8 Macrografía de la unión disímil A6061-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 1200 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 1 mm y un ángulo de inclinación de 3° (*Muestra 1*). Los incisos indican la ubicación de las micrografías obtenidas.

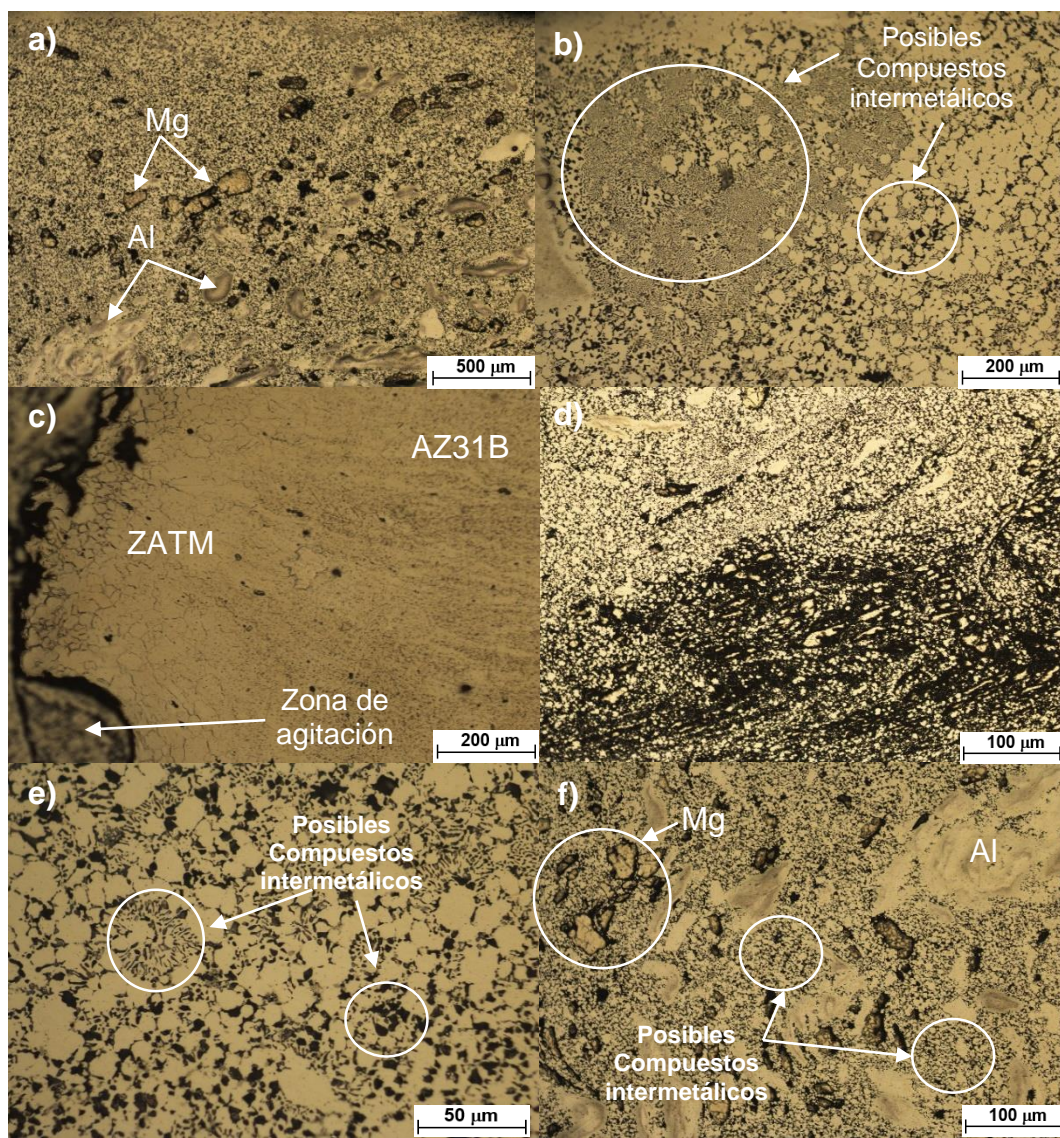


Figura 4.9 Micrografías de la unión disímil A6061-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 1200 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 1 mm y un ángulo de inclinación de 3° (*Muestra 1*)

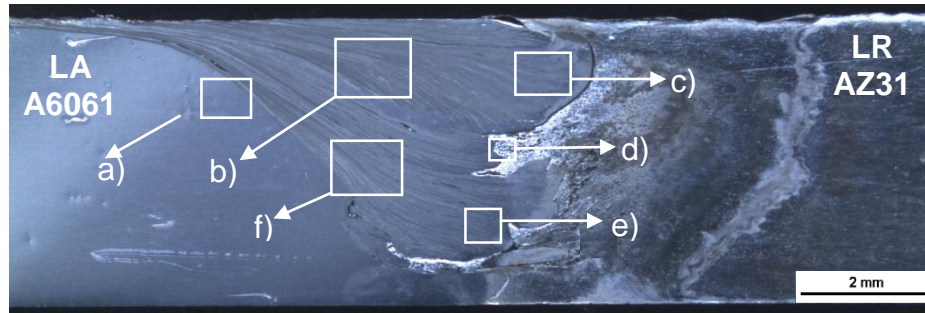


Figura 4.10 Macrografía de la unión disímil A6061-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 400 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 0 mm y un ángulo de inclinación de 1° (*Muestra 2*). Los incisos indican la ubicación de las micrografías obtenidas.

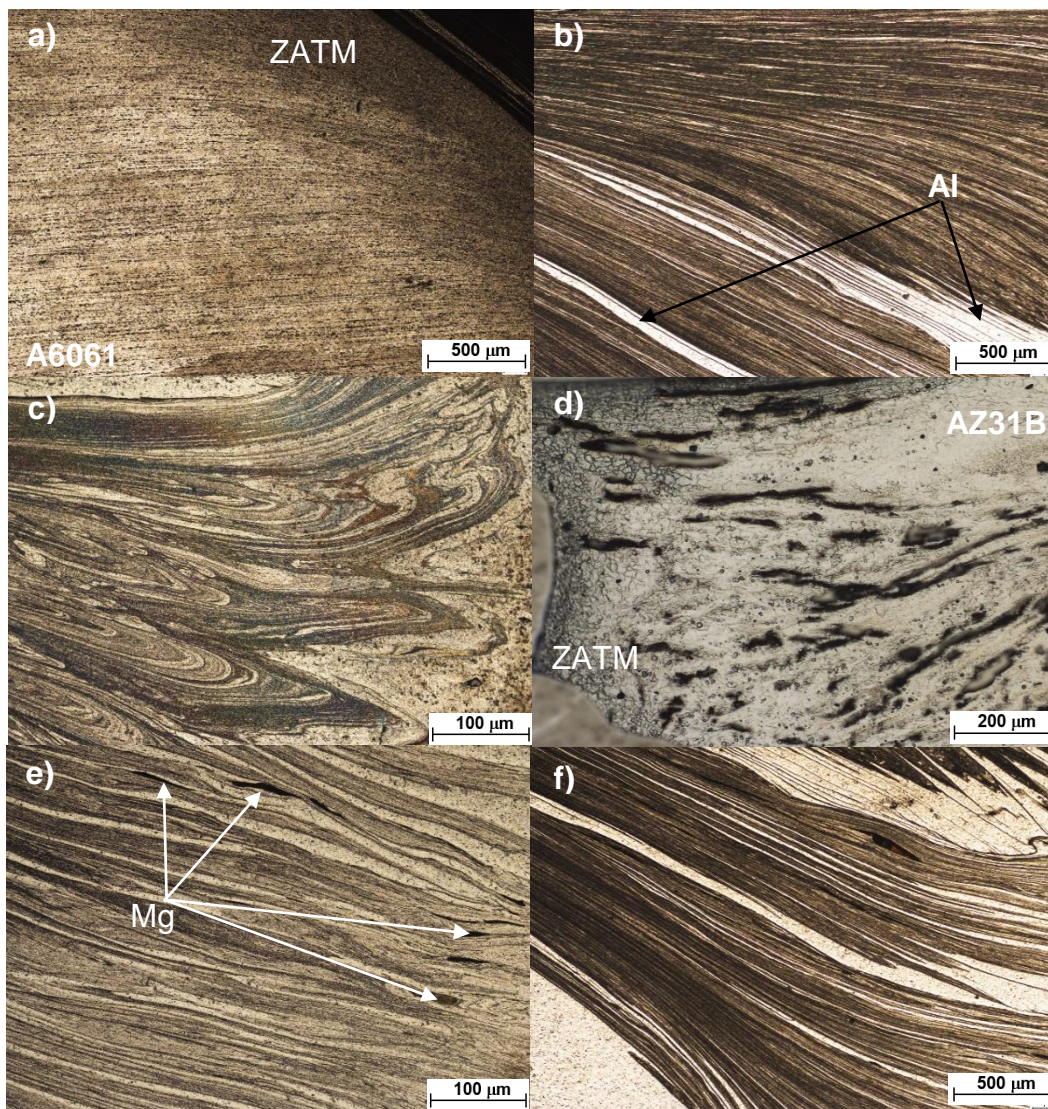


Figura 4.11 Micrografías de la unión disímil A6061-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 400 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 0 mm y un ángulo de inclinación de 1° (*Muestra 2*).

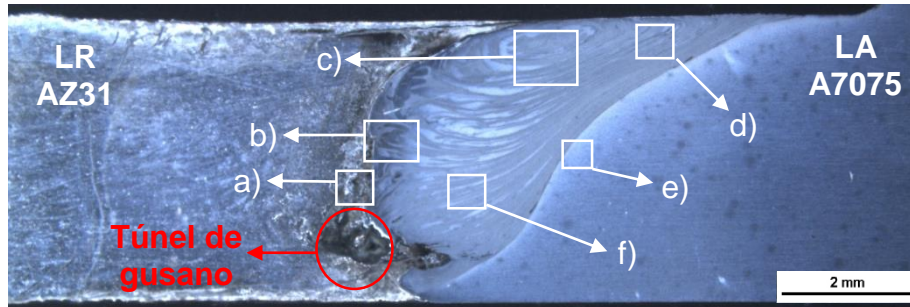


Figura 4.12 Macrografía de la unión disímil A7075-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 200 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 1 mm y un ángulo de inclinación de 3° (*Muestra 3*). Los incisos indican la ubicación de las micrografías obtenidas.

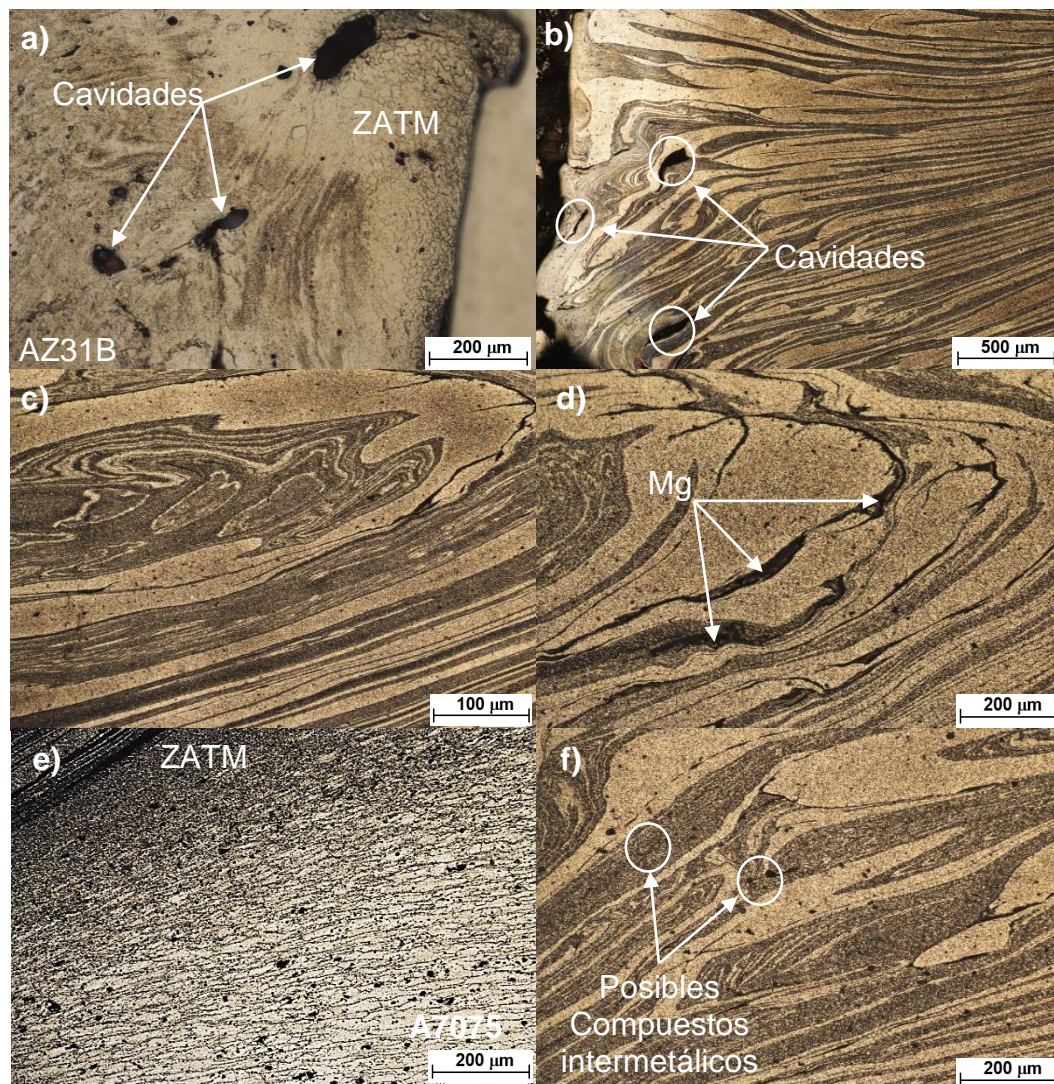


Figura 4.13 Micrografías de la unión disímil A7075-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 200 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 1 mm y un ángulo de inclinación de 3° (*Muestra 3*).

4.5 Microdureza Vickers

Con la finalidad de determinar la dureza de las uniones disímiles obtenidas en este trabajo, se realizaron tres perfiles de microdureza Vickers en cada una de las uniones soldadas con una carga de 0.3 Kg_f en un durómetro modelo Tuk 2500.

En la Figura 4.14 se pueden apreciar los diferentes valores de microdureza obtenidas en la *Muestra 1*, la cual fue soldada empleando una velocidad de rotación de 1200 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 1 mm en la aleación AZ31B y un ángulo de inclinación de la herramienta de 3°. Se observa un incremento de los valores de microdureza en la zona de agitación, esto indica la formación de compuestos intermetálicos durante la soldadura y a un refinamiento de grano.

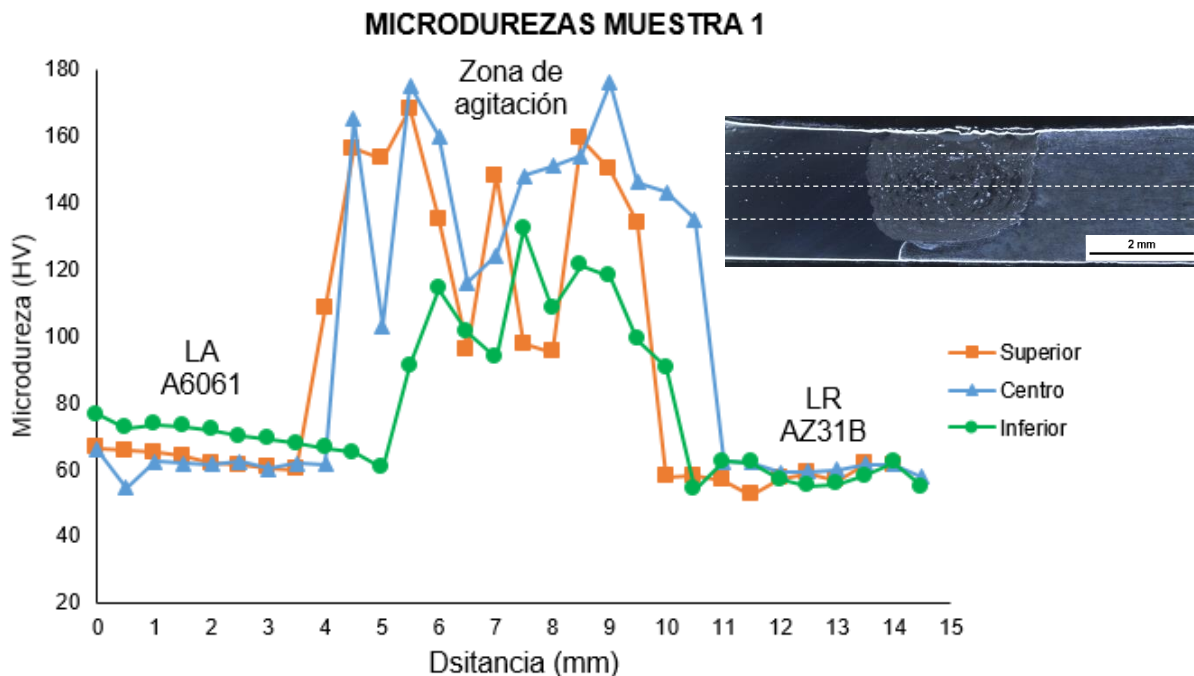


Figura 4.14 Perfil de microdurezas de la *Muestra 1* (A6061-T6/AZ31B) soldada mediante FSW.

El perfil de microdurezas para la unión soldada con una velocidad de rotación de 400 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset en la aleación AZ31B de 0 mm y un ángulo de inclinación de la herramienta de 1° (*Muestra 2*) se muestra en

la Figura 4.15, en la cual se puede observar que tiene un comportamiento similar al de la *Muestra 1*, existe un incremento de los valores de microdureza en la zona de agitación, lo que puede confirmar la presencia de compuestos intermetálicos y también, según la bibliografía analizada, a un tamaño de grano más fino. Además, es posible observar que existe un desplazamiento de los valores de microdureza debido a la forma que se obtuvo de la zona de agitación.

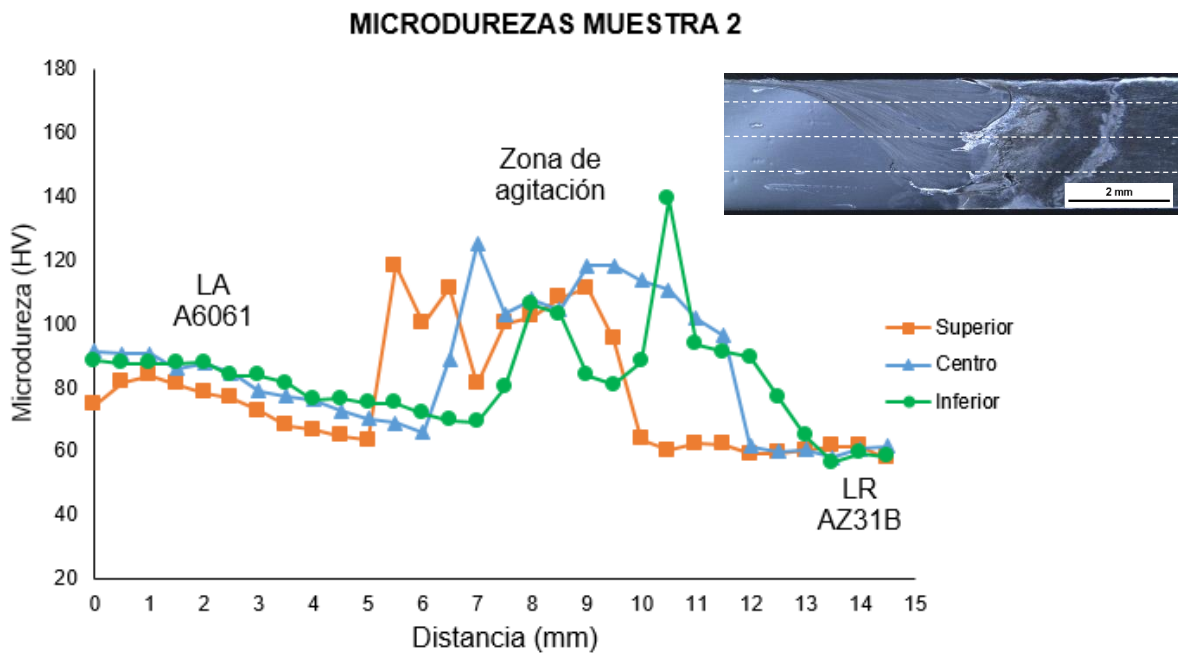


Figura 4.15 Perfil de microdurezas de la *Muestra 2* (A6061-T6/AZ31B) soldada mediante FSW.

En la Figura 4.16 se muestran los diferentes valores de microdureza obtenidas en la *Muestra 3* soldada empleando una velocidad de rotación de 200 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 1 mm en la aleación AZ31B y un ángulo de inclinación de la herramienta de 3°. El mismo patrón de valores elevados en la microdureza es observado en la zona de agitación por la presencia de compuestos intermetálicos ($Al_{12}Mg_{17}$ y Al_3Mg_2) y al refinamiento de grano que produce el FSW. También es importante mencionar que los valores más bajos en el perfil de la microdureza (círculos rojos) se deben a la presencia de defectos presentes en la unión soldada.

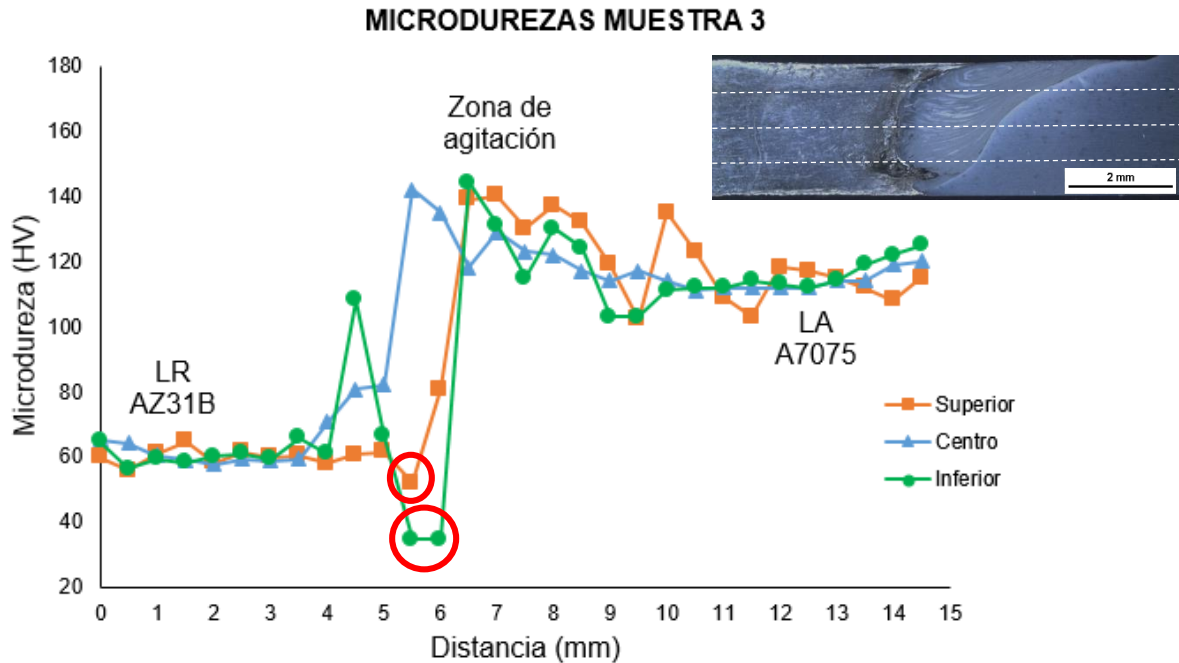


Figura 4.16 Perfil de microdurezas de la *Muestra 3* (A7075-T6/AZ31B) soldada mediante FSW.

4.6 Ensayo de tensión

Para evaluar la resistencia obtenida en las uniones, se llevaron a cabo pruebas de resistencia a la tensión y se compararon con los materiales base (se ensayaron dos probetas de cada unión). Los resultados de esta prueba se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Resultados de la prueba de tensión.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Carga máxima (N)	Tensión máxima (MPa)	Alargamiento a la rotura (%)	Módulo (MPa)
Muestra 1A	5.530	6.450	602.608	16.9	0.096	20768.359
Muestra 1B	5.540	6.420	745.316	21.0	0.229	9532.073
Muestra 2A	5.890	6.410	3339.730	88.5	0.175	55917.939
Muestra 2B	5.890	6.440	3335.990	87.9	0.171	57456.208
Muestra 3A	5.800	6.450	2123.417	56.8	0.195	30489.555
Muestra 3B	5.800	6.480	2477.641	65.9	0.125	69701.769

Se puede apreciar el comportamiento gráfico de las probetas en la Figura 4.17, Figura 4.18 y en la Figura 4.19.

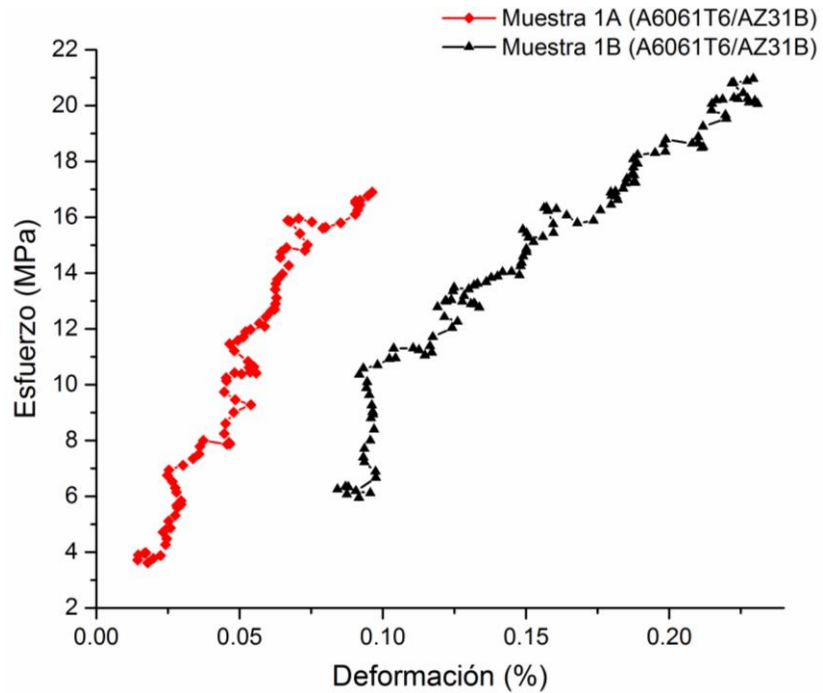


Figura 4.17 Gráfica de la prueba de tensión de la unión disímil A6061-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 1200 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 1 mm y un ángulo de inclinación de 3° (*Muestra 1*).

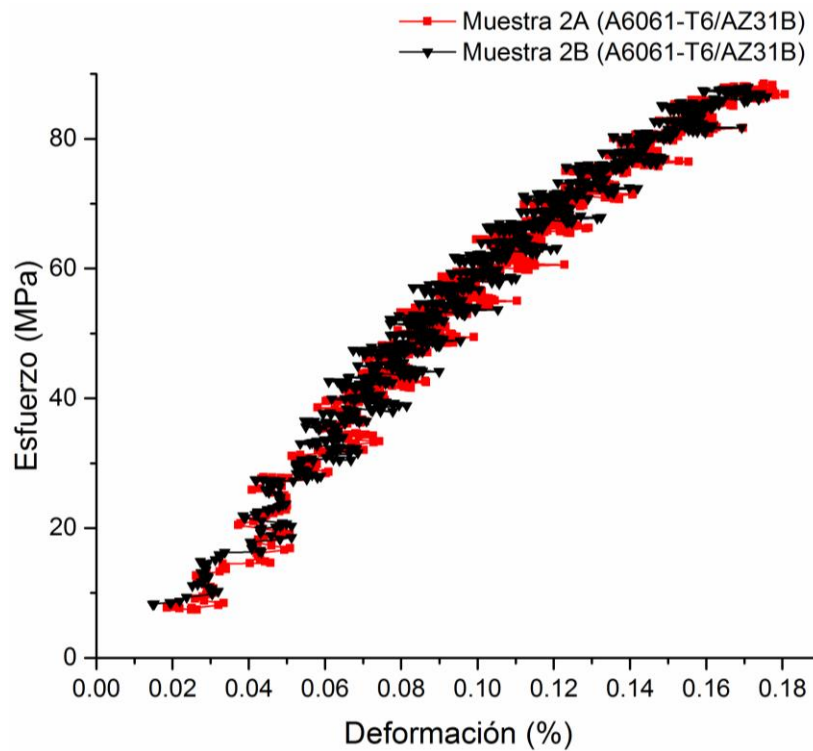


Figura 4.18 Gráfica de la prueba de tensión de la unión disímil A6061-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 400 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 0 mm y un ángulo de inclinación de 1° (*Muestra 2*).

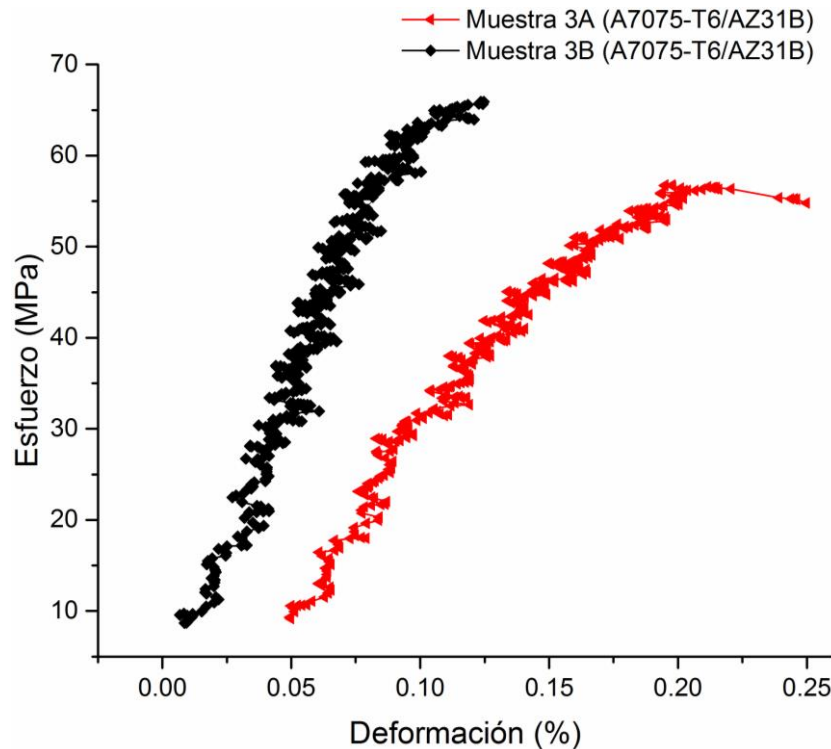


Figura 4.19 Gráfica de la prueba de tensión de la unión disímil A7075-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 200 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 1 mm y un ángulo de inclinación de 3° (*Muestra 3*).

Los resultados obtenidos mediante este ensayo proporcionan información destacable, donde la *Muestra 1* es la que obtuvo datos más bajos de esfuerzo máximo en comparación con las otras uniones. La *Muestra 2* es la unión que presenta valores de esfuerzo máximo más elevados (88.5 y 87.9 MPa) cuya variación concuerda con los rangos encontrados en la literatura (35 – 112 MPa). En base a lo anterior, es posible observar que se mejoraron las propiedades de tensión en la unión al disminuir la velocidad de rotación en la soldadura (*Muestra 1* con una velocidad de rotación de 1200 rpm y la *Muestra 2* con una velocidad de rotación de 400 rpm)

Por último, cabe señalar que la fractura de todas las probetas ocurrió en la zona de la soldadura (en este trabajo no se muestran imágenes de las probetas) que puede ser atribuido a la falta de penetración presente en las uniones y se confirma la presencia de compuestos intermetálicos en la zona de agitación.

CONCLUSIONES

De acuerdo a la bibliografía consultada en este trabajo, se puede concluir que:

- Existe información que muestra el efecto que los parámetros de soldadura por fricción-agitación tienen en la microestructura de las uniones disímiles y sobre sus propiedades mecánicas.
- Con una buena elección de los parámetros, es posible unir las aleaciones de aluminio/magnesio mediante el proceso FSW y obtener uniones de excelente calidad con un tamaño de grano refinado y buenas propiedades mecánicas.
- En este tipo de uniones siempre existe la formación de los compuestos intermetálicos $Al_{12}Mg_{17}$ y Al_3Mg_2 que incrementan la dureza en la zona de agitación, y esto puede fragilizar la unión si no se emplean los parámetros adecuados para que la herramienta pueda disolver o romper a estos compuestos en un menor tamaño.

En cuanto al caso de estudio realizado en este trabajo se puede concluir:

- Las uniones disímiles muestran la presencia de compuestos intermetálicos en la zona de agitación, los cuales en este caso de estudio no se pudieron analizar mediante otras técnicas para conocer su composición exacta, sin embargo de acuerdo a la literatura, éstos intermetálicos son los que se presentan en las diferentes tipo de uniones, además esto se confirmó con los valores de microdureza al ser más elevadas en esta zona (139 – 175 Hv), así como, los valores obtenidos de esfuerzo máximo (16.9 – 88.5 MPa) durante el ensayo de tensión como se ha reportado en la literatura (35 – 112 MPa de esfuerzo de tensión).
- La *Muestra 2* (A6061-T6/AZ31B) obtuvo mejores resultados del ensayo de tensión (esfuerzo máximo de 88.5 y 87.9 MPa), presentando una mayor dureza en la zona de agitación.
- La *Muestra 3* (A7075-T6/AZ31B) es la unión disímil que presentó una mayor cantidad de defectos típicos de la soldadura por fricción-agitación como cavidades, el túnel de gusano y falta de penetración.
- Existe un refinamiento de grano de 2 ASTM en el metal base a $8^{1/2}$ – 9 ASTM en la ZATM del lado de avance (aleación de aluminio).
- La fractura de las probetas durante el ensayo de tensión ocurrió en las uniones soldadas como se ha mencionado en la bibliografía analizada.
- Por último, se recomienda hacer un análisis de microscopía electrónica de barrido (MEB) empleando electrones retrodispersados o un análisis puntual en las uniones soldadas con la finalidad de corroborar la presencia de los compuestos intermetálicos reportados en la literatura, al igual que realizar una modificación de parámetros con los que se puedan obtener

uniones de excelente calidad y buenas propiedades mecánicas (microdureza y tensión).

Tablas

Tabla 2.1 Propiedades físicas y mecánicas del aluminio (6,7).....	6
Tabla 2.2 Clasificación de las aleaciones de aluminio según el método de fabricación (7).....	9
Tabla 2.3 Clasificación para las aleaciones de aluminio según el grado de endurecimiento (5,7).	10
Tabla 2.4 Composición química de la aleación A6061 (11).	11
Tabla 2.5 Propiedades físicas y mecánicas de la aleación A6061 (11).	11
Tabla 2.6 Composición química de la aleación A7075 (11).	12
Tabla 2.7 Propiedades físicas de la aleación A7075 (11).	12
Tabla 2.8 Solubilidad sólida de varios elementos de aleación en el aluminio (15).	14
Tabla 2.9 Secuencia de precipitación de las aleaciones de aluminio de las series 6XXX y 7XXX (20).	18
Tabla 2.10 Características de las fases secundarias que se presentan en las aleaciones de aluminio de las series 6XXX y 7XXX (21).	19
Tabla 2.11 Propiedades físicas y mecánicas del magnesio (6).	20
Tabla 2.12 Códigos ASTM para los elementos de aleación de magnesio (23).....	22
Tabla 2.13 Composición química de la aleación AZ31B (25).....	23
Tabla 2.14 Propiedades físicas y mecánicas de la aleación AZ31B (25).....	23
Tabla 2.15 Datos de solubilidad para las aleaciones de magnesio binarios (15)..	24
Tabla 2.16 Ventajas del proceso FSW (26,29).	33
Tabla 2.17 Efecto de la velocidad de rotación sobre las propiedades de resistencia (vel. de soldadura = 60 mm/min, carga axial = 8 kN, diámetro del hombro = 15 mm, diámetro del pin = 5 mm y dureza de la herramienta = 45 HRC) (12).	36
Tabla 3.1 Resumen de estudios encontrados en la literatura de aleaciones ligeras (A7075-T6 y AZ31B) y uniones disímiles de Al/Mg soldadas mediante el proceso FSW.	53
Tabla 4.1 Composición química de la aleación A6061-T6.	55
Tabla 4.2 Composición química de la aleación A7075-T6.	56

Tabla 4.3 Composición química de la aleación AZ31B.....	56
Tabla 4.4 Parámetros de soldadura utilizados para la unión disímil de las aleaciones A6061-T6/AZ31B y A7075-T6/AZ31B.	57
Tabla 4.5 Resultados de la prueba de tensión.....	67

Figuras

Figura 2.1 Equilibrio de la solubilidad sólida binaria como una función de la temperatura para elementos de aleación más frecuentemente encontrados en el aluminio (14).....	13
Figura 2.2 Extremo rico en aluminio del diagrama de fases aluminio-cobre, mostrando los tres pasos en el tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento y las microestructuras que se producen (7).....	17
Figura 2.3 Esquema de una configuración de unión a tope mediante la soldadura por fricción-agitación (27).....	27
Figura 2.4 Esquema representativo del proceso FSW, a) posicionamiento y rotación, b) penetración, c) avance y d) extracción (28).....	28
Figura 2.5 Zonas microestructurales en la sección transversal de un material soldado mediante el FSW (30).....	30
Figura 2.6 Algunos defectos que se presentan en la soldadura por fricción-agitación (FSW) (33).....	32
Figura 2.7 Defecto conocido como kissing-bond (34).....	32
Figura 2.8 Efecto de la velocidad de avance en la microestructura (36).	38
Figura 2.9 Sección transversal de las diferentes áreas de la unión a traslape de Mg-Al con una velocidad de rotación de 1400 rpm y velocidad de soldadura de 40 mm/min (2).....	40
Figura 2.10 Micrografías mediante MEB de la sección transversal de diferentes áreas en la unión de Mg-Al con una relación de velocidad de rotación de 1400 rpm y una velocidad de soldadura de 40 mm/min (2).....	41
Figura 2.11 Perfil de dureza registrado a través de la sección transversal de la muestra soldada a una velocidad de rotación de 1400 rpm y una velocidad de soldadura de 40 mm/min (2).....	42
Figura 2.12 Imágenes mediante microscopía óptica de la sección transversal de la unión disímil obtenidas por los parámetros a) velocidad de rotación de la herramienta =1600 rpm y velocidad de avance = 250 mm/min, (b-d) velocidad de	

avance fija de 500 mm/min con velocidades de rotación de la herramienta variables de 1600, 1400, 1200 rpm respectivamente (37).....	43
Figura 2.13 Microestructuras de las diferentes zonas del lado del magnesio en la unión disimilar de Al/Mg utilizando 1400 rpm y 500 mm/min (37).	44
Figura 2.14 Microestructuras de las diferentes zonas del lado del aluminio en la unión disimilar de Al/Mg utilizando 1400 rpm y 500 mm/min (37).	45
Figura 2.15 Análisis por MEB de la zona de agitación en una unión utilizando 1400 rpm y 500 mm/min a) zona de agitación del Mg, b) zona de agitación del Al, c) compuestos intermetálico en la interface entre Al y Mg y d) zona de agitación en el Al, precipitados fragmentados (37).....	46
Figura 2.16 Microdurezas de las uniones disímiles de A6061/AZ31B (37).	47
Figura 2.17 Unión soldada con 1400 rpm y 500 mm/min fracturada después de la carga de tensión, a) macrografía, b) muestra observada con el microscopio óptico (37).....	48
Figura 2.18 Fractografía mediante MEB de la muestra soldada con 1400 rpm y 500 mm/min a temperatura ambiente (37).	48
Figura 2.19 Microestructuras de las diferentes regiones de la zona FSW (4)	49
Figura 2.20 Curvas de dureza de las diferentes muestras (4).....	50
Figura 2.21 Esfuerzo de tensión en la zona soldada (4)	50
Figura 4.1 Diagrama de la metodología experimental empleada para este caso de estudio.....	55
Figura 4.2 Diseño de la junta para la unión disímil de Al/Mg mediante FSW	56
Figura 4.3 Equipo STIR PDS Intelligent Stir Welding MTS.....	56
Figura 4.4 a) Colocación del pin 1 mm en el lado del magnesio (Offset), b) Ángulo de inclinación entre la superficie de la soldadura y la herramienta de FSW.	58
Figura 4.5 Micrografía de la aleación A6061-T6.....	59
Figura 4.6 Micrografía de la aleación A7075-T6.....	60
Figura 4.7 Micrografía de la aleación AZ31B.....	60
Figura 4.8 Macrografía de la unión disímil A6061-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 1200 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 1 mm y un	

ángulo de inclinación de 3° (<i>Muestra 1</i>). Los incisos indican la ubicación de las micrografías obtenidas.	62
Figura 4.9 Micrografías de la unión disímil A6061-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 1200 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 1 mm y un ángulo de inclinación de 3° (<i>Muestra 1</i>)	62
Figura 4.10 Macrografía de la unión disímil A6061-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 400 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 0 mm y un ángulo de inclinación de 1° (<i>Muestra 2</i>). Los incisos indican la ubicación de las micrografías obtenidas.	63
Figura 4.11 Micrografías de la unión disímil A6061-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 400 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 0 mm y un ángulo de inclinación de 1° (<i>Muestra 2</i>).	63
Figura 4.12 Macrografía de la unión disímil A7075-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 200 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 1 mm y un ángulo de inclinación de 3° (<i>Muestra 3</i>). Los incisos indican la ubicación de las micrografías obtenidas.	64
Figura 4.13 Micrografías de la unión disímil A7075-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 200 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 1 mm y un ángulo de inclinación de 3° (<i>Muestra 3</i>).	64
Figura 4.14 Perfil de microdurezas de la <i>Muestra 1</i> (A6061-T6/AZ31B) soldada mediante FSW.....	65
Figura 4.15 Perfil de microdurezas de la <i>Muestra 2</i> (A6061-T6/AZ31B) soldada mediante FSW.....	66
Figura 4.16 Perfil de microdurezas de la <i>Muestra 3</i> (A7075-T6/AZ31B) soldada mediante FSW.....	67
Figura 4.17 Gráfica de la prueba de tensión de la unión disímil A6061-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 1200 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 1 mm y un ángulo de inclinación de 3° (<i>Muestra 1</i>).	68
Figura 4.18 Gráfica de la prueba de tensión de la unión disímil A6061-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 400 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 0 mm y un ángulo de inclinación de 1° (<i>Muestra 2</i>).	68

Figura 4.19 Gráfica de la prueba de tensión de la unión disímil A7075-T6/AZ31B con una velocidad de rotación de 200 rpm, velocidad de avance de 30 mm/min, un offset de 1 mm y un ángulo de inclinación de 3° (*Muestra 3*)..... 69

BIBLIOGRAFÍA

1. **Yan Y, Zhang D, Qiu C, Zhang W.** Dissimilar friction stir welding between 5052 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy. *Trans Nonferrous Met Soc China. The Nonferrous Metals Society of China*; 20:619–23 (2010).
2. **Mohammadi J, Behnamian Y, Mostafaei A., Izadi H, Saeid T, Kokabi A. H, et al.** Friction stir welding joint of dissimilar materials between AZ31B magnesium and 6061 aluminum alloys: Microstructure studies and mechanical characterizations. *Mater Charact. Elsevier Inc.*; 101:189–207 (2015).
3. **Fu B, Qin G, Li F, Meng X, Zhang J, Wu C.** Friction stir welding process of dissimilar metals of 6061-T6 aluminum alloy to AZ31B magnesium alloy. *J Mater Process Technol. Elsevier B.V.*; 218:38–47 (2015).
4. **Li D, Cui Z, Yang Q, Sun B, Sun M.** Microstructure and property of friction stir welding joint of 7075Al and AZ31BMg. *J Shanghai Jiaotong Univ.* 17(6):679–83 (2012).
5. **Anderson T., CEng, FWeldl Cwe.** Chapter 2. Welding Aluminum—Questions and Answers. 2nd edition. p. 11–8 (2010).
6. **James F.** Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros. Edición 6, editor. PEARSON Prentice Hall; (2005).
7. **Askeland D.** Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Editores IT, editor. 4 Edición; (2001).
8. **Kalpakjian S.R, Schmid S.** MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA. 5a Edición. PEARSON Prentice Hall; (2008).
9. **Pereira J.C, Durán L, Van Deventer D, Zambrano J.C.** Propiedades mecánicas en torsión de la aleación de aluminio AA6061 con diferentes tratamientos térmicos. *Rev Ing UC.*;17(7):44–51; (2010).
10. **TECNIACEROS.** Ficha Técnica Tecniaceros [Internet]. Available from: <http://www.tecniaceros.com/>[cited 2015 Mar 30]
11. **ALU-STOCK.** Información técnica ALU-STOCK [Internet]. Available from: www.alu-stock.es [cited 2015 Mar 30]

12. **Rajakumar S, Muralidharan C, Balasubramanian V.** Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints. *Mater Des.* Elsevier Ltd; 32(2):535–49; (2011).
13. **Campbell F.C.** *Lightweight Materials - Understanding the Basics.* ASM International; (2012).
14. **ASM Handbook.** Properties and selection-nonferrous alloys and special-purpose materials. Volume 02. *ASM Handbook*, editor. ASM International; (1990).
15. **Polmear I.J.** *Light Alloys - From Traditional Alloys to Nanocrystals.* 4th Edition. Elsevier; (2006).
16. **Singh, Ramesh.** *Applied Welding Engineering - Processes, Codes and Standards.* Elsevier; (2012).
17. **Dieter, George E.** *ASM Handbook, Materials Selection and Design.* ASM International; (1997).
18. **Campbell F.C.** *Phase Diagrams - Understanding the Basics.* ASM International; (2012).
19. **Campbell F.C.** *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials.* Elsevier; (2006).
20. **Hannink R.H J, Hill A.J.** *Nanostructure Control of Materials.* Woodhead Publishing; (2006).
21. **Vander V, George F.** *ASM Handbook, Volume 09 - Metallography and Microstructures.* ASM International; (2004).
22. **Kulekci M.** Magnesium and its alloys applications in automotive industry. *Int J Adv Manuf Technol.*; 39(9-10):851–65; (2008).
23. **Friedrich H.E, Mordike B.L.** *Magnesium Technology. Metallurgy, Design Data, Applications.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg; (2006).
24. **Czerwinski F.** *Magnesium Injection Molding.* Springer Science+Business Media, LCC; (2008).
25. **NeoNickel.** Ficha técnica de la aleación AZ31B [Internet]. Available from: <http://www.neonickel.com> [cited 2015 Mar 30]
26. **Sharan Mishra R, Sarathi De Nilesh Kumar P.** *Friction Stir Welding and Processing.* Springer; (2014).

27. **Chowdhury S.H, Chen D.L, Bhole S.D, Cao X, Wanjara P.** Friction Stir Welded AZ31 Magnesium Alloy: Microstructure, Texture, and Tensile Properties. *Metall Mater Trans A.*; 44(January):41–4; (2012).
28. **Aldanondo E, Alvarez P, Monaco da Silva A.A, Echeverría A, Arruti E.** AVANCES EN LA TECNOLOGÍA DE SOLDADURA POR FRICCIÓN “STIR.” *Dyna*; 86:614–8; (2011).
29. **Kumar R, Ghosh A, Chattopadhyaya S.** Emerging Friction Stir Welding for Aluminium and its Applications. *Manuf Ind Eng.*; 2972:1–5; (2015).
30. **Mishra R.S, Mahoney M.W.** Friction Stir Welding and Processing. ASM International; (2007).
31. **Çam G, Mistikoglu S.** Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys. *J Mater Eng Perform.*; 23(6):1936–53; (2014).
32. **Gibson B.T, Lammlein D.H, Prater T.J, Longhurst W.R, Cox C.D, Ballun M.C, et al.** Friction stir welding: Process, automation, and control. *Manuf Process. The Society of Manufacturing Engineers*; 16(1):56–73; (2014).
33. **Lohwasser, Chen D, Zhan.** Friction Stir Welding - From Basics to Applications. Woodhead Publishing; (2010).
34. **O’Brien, Annette.** Welding Handbook, Volume 3 - Welding Processes, Part 2. 9th edition. American Welding Society (AWS); (2007).
35. **Uyyuru R.K, Kailas S.V.** Numerical Analysis of Friction Stir Welding Process. *J Mater Eng Perform.*; 15(5):505–18; (2006).
36. **Padmanaban G, Balasubramanian V.** An experimental investigation on friction stir welding of AZ31B magnesium alloy. *Int J Adv Manuf Technol.*; 49(1-4):111–21;(2010).
37. **Dorbane A, Mansoor B, Ayoub G, Shunmugasamy V.C, Imad A.** Mechanical, microstructural and fracture properties of dissimilar welds produced by friction stir welding of AZ31B and Al6061. *Mater Sci Eng A.* (2015)