

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



EFFECTO EN LA MICROESTRUCTURA DE LOS PARÁMETROS DEL
PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN LA
MICROESTRUCTURA EN UNIONES DE COMPUESTOS AVANZADOS DE
MATRIZ METÁLICA

POR

OCTAVIO CUEVAS MATA

MONOGRAFÍA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO, COAHUILA, ~~DE~~ NOVIEMBRE-DICIEMBRE DEL 2014

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



EFFECTO EN LA MICROESTRUCTURA DE LOS PARÁMETROS DEL
PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN LA
MICROESTRUCTURA EN UNIONES DE COMPUESTOS AVANZADOS DE
MATRIZ METÁLICA

POR

OCTAVIO CUEVAS MATA

MONOGRAFÍA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

| SALTILLO, COAHUILA, ~~DE NOVIEMBRE~~ DICIEMBRE DEL 2014

~~Corporación Mexicana de Investigación en Materiales~~
~~Corporación Mexicana de Investigación en Materiales~~

AGRADECIMIENTOS

En esta oportunidad tengo el gusto de agradecer a COMIMSA y Conacyt por haberme brindado la posibilidad de perfeccionarme proporcionándome una beca para estudios de post grado y por haberme facilitado las instalaciones para el desarrollo de este trabajo.

Estoy totalmente agradecido con la Dra. Argelia Fabiola Miranda, por su orientación, asesoramiento y por su ánimo consistente. Ella ha sido una enorme fuente de motivación. También me encuentro agradecido con el resto del comité tutorial, Dra. Gladys Yerania Pérez y el Dr. Felipe de Jesús García Vázquez por su preciado tiempo y asesoramiento en la elaboración de la monografía.

A los compañeros de la especialidad por todas las situaciones que compartimos, las clases y prácticas que en conjunto aprendimos, además de todos los conocimientos y experiencias profesionales que cada uno posee mismos que fueron compartidos dentro de las aulas.

A todos los Doctores y Maestros que nos instruyeron en cada una de las materias durante los estudios de pos-grado, en especial al Ing. Jesús García por esas palabras que me motivaron a cambiar la perspectiva de ver y hacer las cosas tanto de manera profesional como personal.

Con formato: Derecha: 0 cm

Con formato: Sangría: Izquierda: 0.76 cm, Espacio Antes: 0 pto, Interlineado: 1.5 líneas, No conservar líneas juntas

DEDICATORIAS

A Dios

Por sus bendiciones e iluminar mi sendero a lo largo de mi vida, darme la inteligencia y brindarme la fuerza necesaria, para poder lograr uno de mis grandes propósitos en mi vida profesional.

Ma. de la Luz Anguiano Mendoza

A mí abuela, porque indirectamente me inculco el hábito de la lectura cuando era adolescente, factor que me ha ayudado a incrementar y fortalecer mis conocimientos. También por compartir su gran sabiduría conmigo y por esas pláticas tan amenas y agradables.

Pilar Idalia Mata Anguiano

A mí madre, que a lo largo de mi vida me ha iluminado tanto en los buenos momentos como también los de tristeza y que con su cariño me ha ayudado a ver siempre un buen mañana y un gran futuro a base de esfuerzo.

Francisco Javier Cuevas Carrillo

A mí padre, a quien nunca comprendí y no supe conocer ni tampoco valorar. El me ayudo a adquirir el valor y coraje para enfrentar la vida debido a su ausencia durante los años que tengo de vida, haciéndome ver un mejor camino.

Emiliano y Anna Victoria Cuevas Medina

A mis hijos, que son la luz que iluminan mi camino en esta vida y que me hacen ser mejor persona. Hoy comparto mis logros con ustedes, pero anhelo el día en que ustedes compartan sus logros conmigo, y doy gracias a Dios por darme el privilegio de ser su padre; aunque aún son muy pequeños les doy

gracias por su confianza y amor y sepan que el tiempo que estoy con ustedes lo atesoro mucho y lo aprovecho al máximo, los amo y los amaré por siempre.

Laura Cecilia Cardona Ruiz

A mi novia, que a quién conocí por azares del destino de una forma inesperada y extraordinaria, ha estado a mi lado este tiempo. Le agradezco por ser mi guía, mi apoyo, y por demostrarme todo ese amor que me ofrece incondicionalmente día a día.

J. Beatriz Mata Anguiano y Jaime Salinas Bustos

A mis tíos, que me han apoyado con su techo, con alimentos en todos estos años, y que desde la infancia me han enseñado que hay que trabajar día a día para poder conseguir las cosas, poder salir adelante y vivir mejor.

Diana, Carolina, Alonso y Mariana Salinas Mata

A mis primos que considero como mis hermanos, por ser guías en mí vida, que me han ayudado a forjar mi carácter y también permitirme ayudarlos y enseñarme a convivir, y además compartir momentos alegres y momentos difíciles.

Noé Mata del Río y Efraín Herrera Mata

A mis primos quienes me apoyaron en los momentos más difíciles, y aunque tal vez parezca algo muy insignificante, en verdad valoro mucho ese apoyo brindado, de corazón lo agradezco.

A la vida que me ha permitido conocer la felicidad, que me ha hecho caer y también me ha dejado levantarme, para continuar adquiriendo experiencia y de esa forma a vivir mejor.

1. CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	333
1.1 Antecedentes.....	333
1.2 Objetivos.....	766
1.2.1 Objetivo General.....	766
1.2.2 Objetivos Específicos.....	766
1.3 Justificación.....	877
1.4 Planteamiento del Problema.....	988
1.5 Aportación Tecnológica.....	1099
1.6 Alcance.....	1099
2. CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE.....	114010
2.1 Soldadura por Fricción – Agitación.....	114010
2.1.1 Fundamentos del Proceso.....	131212
2.1.2 Variables del Proceso.....	242120
2.1.3 Aplicaciones del proceso FSW.....	282524
2.2 Materiales Compuestos.....	292625
2.2.1 Conceptos Básicos.....	292625
2.3 Compuestos de Matriz Metálica.....	302726
2.3.1 Antecedentes Históricos de MMC.....	312827
2.3.2 Tipos de Procesamiento de MMC.....	333029
2.3.3 Matrices Metálicas.....	393735
2.3.4 Materiales de Refuerzo.....	424038
2.3.5 Materiales Compuestos Al-SiC.....	494745
2.4 Aplicación de los MMC.....	514946
2.4.1 Estructuras Aeroespaciales y Aeronáuticas.....	525047
2.4.2 Aplicaciones de Presión.....	535148
2.4.3 Óptica.....	535149

Con formato: Fuente: 12 pto, Sin Negrita, Español (México)

Con formato: Justificado

2.4.4	Equipos Deportivos	545149
2.4.5	Aplicaciones de Alta Temperatura.....	545250
2.4.6	Militar.....	545250
2.4.7	Industria Automotriz	555250
2.5	Aplicación del Proceso FSW en la Industria Automotriz	555351
2.6	Técnicas de Caracterización.....	636158
2.6.1	Técnicas de Caracterización	646259
2.6.2	Preparación de Muestras	706865
2.6.3	Aplicaciones Prácticas Recientes.....	817976
2.7	Microestructura del material compuesto A359/SiC/20p	1009087
3.	CAPÍTULO 3 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LA BIBLIOGRAFÍA	1059390
3.1	Importancia de los procesos de soldadura	1059390
3.2	Compuestos de Matriz Metálica (MMC).....	1069491
3.3	Proceso de Soldadura por Fricción – Agitación (FSW).....	1069491
3.4	Métodos de caracterización microestructural.....	1079592
3.5	Aplicación del proceso FSW en la industria automotriz	1099794
3.6	Aplicación del proceso FSW en AMC reforzados con SiC.....	1099794
4.	CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES.....	115403100
4.1	Material compuesto de matriz metálica de aluminio	115403100
4.2	Caracterización del material compuesto de matriz de aluminio.....	118405102
4.2.1	Preparación y ataque	119405102
4.3	Soldadura FSW y caracterización del material AMC	120407104
4.3.1	Unión FSW en placas del material AMC	120407104
4.3.2	Caracterización de la unión en placas del material AMC	121408105
4.4	Resultados.....	123409106
4.4.1	Microestructura de Material Base de AMC.....	123409106
4.4.2	Microestructura de la unión del Material de AMC.....	124411108
4.4.3	Evaluación de microdureza en la unión del Material de AMC.....	130415112
5.	CAPÍTULO 5 CASO DE ESTUDIO	132416113
6.	BIBLIOGRAFÍA	135419116

Síntesis

Desde la segunda guerra mundial, los materiales compuestos han sido objeto de investigación ya que sus propiedades estructurales, tribológicas, térmicas y eléctricas eran utilizados para la construcción de la estructura de los bombarderos de los Estados Unidos, por lo que esta tecnología era costosa solamente por el gobierno y por el ejército. A partir de los años 50's y 60's la tecnología de materiales compuestos tuvo un lanzamiento de forma relevante en lo que al sector industrial se refiere, en donde se requería el desarrollo de procesos de unión efectivos y técnicas de caracterización adecuadas, las cuales dieran lugar de manera satisfactoria el análisis de transformaciones de fases y comportamiento mecánico.

El aluminio y sus aleaciones son las matrices metálicas más utilizadas para la fabricación de materiales compuestos, debido a su baja densidad, capacidad de endurecimiento por precipitación, buena resistencia a la corrosión y elevadas conductividades térmica y eléctrica. Las propiedades de los materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con partículas cerámicas [\(AMC, siglas en inglés\)](#) dependen de su microestructura, composición, proceso de formación, tamaño y distribución de las partículas de refuerzo y grado de adhesión entre la matriz y las partículas.

Existe una limitante en los compuestos de matriz de aluminio al ser unidos por métodos de soldadura [por](#) fusión, debido a las altas temperaturas que se generan en los mismos, [los cuales generan problemas como agrietamiento.](#)

porosidad, pérdida del material, formación de fases indeseables y eliminación del refuerzo cerámico. eEl proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW, siglas en inglés) es uno de los métodos más viables para la unión de estos materiales, siendo que es el más adecuado ya que disminuye los efectos negativos de temperaturas elevadas.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El ramo automotriz a nivel mundial se ha caracterizado por un constante proceso de reestructuración, principalmente en las últimas décadas, a causa de ello se ha convertido en una de las industrias más dinámicas de la era actual, generando efectos importantes en las diferentes economías en términos de productividad, desarrollo tecnológico y competitividad. A fin de obtener los primeros lugares en producción y ventas en los mercados mundiales, las empresas que integran el sector automotriz han estado constantemente en busca de innovaciones que les permita fortalecer y hacer más competitivos sus procesos productivos. Una de las áreas más importantes en el ramo automotriz es la de diseño, la cual está encargada de establecer las especificaciones del objeto, los procesos y los sistemas vitales.

En la industria automotriz se presentan cuestiones muy importantes tales como la necesidad de reducir el consumo de combustible de los vehículos, mejorar la comodidad y seguridad de los mismos. La mejora de la comodidad (climatización, mecanismos de adaptación de los asientos, etc.) y la mejora de seguridad (ABS, bolsas de aire, barras laterales, etc.) han influido de tal manera que se tenga un incremento de los sistemas a instalar, y de tanto, de los componentes, lo que ha implicado un incremento de peso, y en consecuencia, del consumo. En la figura 1.1 se aprecia un diagrama de los factores que influyen en los cambios dentro de las industrias automotrices. (1)

En el caso del consumo energético, se puede lograr una disminución mejorando el rendimiento de los motores y dispositivos, así como empleando materiales que cuenten con propiedades específicas superiores a las que poseen los utilizados actualmente, lo que permitiría reducir el peso. En cuanto a la introducción de nuevos materiales en sectores tan competitivos ha implicado la necesidad de disminuir costos en los procesos de fabricación.

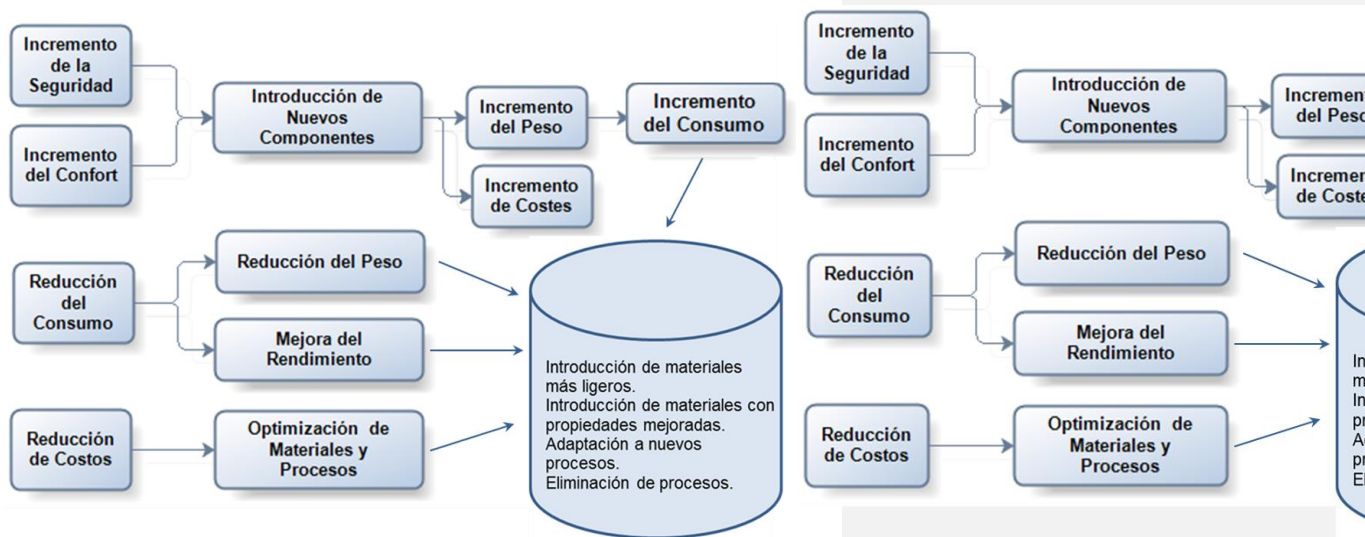


Figura 1.1.4.4 Fuerzas impulsoras de los cambios en las industrias del transporte. (1)

Código de campo cambiado

En el caso de las especificaciones del producto, se determinan la estética, dimensiones y tipo de material con el que serán fabricados los componentes automotrices, además, para algunos de ellos se requiere que posean peso ligero, elevada resistencia al desgaste o abrasión y resistencia mecánica. ~~así que,~~ Existen materiales que cumplen con ~~estas las~~ características ~~mencionadas~~ anteriormente, ~~que son que son~~ los ~~materiales~~ compuestos de matriz metálica (referidas más adelante como MMC por sus siglas en inglés, Metal Matrix Composites).

Los compuestos de matriz metálica (MMC) ~~son~~ son una clase de materiales que poseen propiedades que los hacen muy atractivos para una amplia variedad de aplicaciones, donde se requiere resistencia al desgaste o abrasión, resistencia mecánica, estabilidad química, así como estabilidad dimensional a temperaturas relativamente elevadas (2). La combinación de un refuerzo cerámico capaz de soportar cargas elevadas, con una matriz ligera, proporciona las propiedades mencionadas anteriormente. Otras de las ventajas que ofrecen los MMC es que no son flamables, no dejan escapar gases al vacío, y sufren un mínimo ataque químico por los fluidos orgánicos tales como combustibles y solventes (3). En general, el bajo peso y ~~mejorada~~ relación de resistencia y rigidez de los MMC son obtenidos mediante la combinación de una gran variedad de materiales de matriz monolítica (3). ~~Por lo anterior, la~~ La mayor parte del trabajo comercial sobre los MMC se ha enfocado principalmente en el aluminio como la matriz metálica. La combinación de peso ligero, resistencia al medio ambiente y propiedades mecánicas han hecho que las aleaciones de aluminio sean muy populares. Durante las tres últimas décadas, ha habido considerable interés en el uso de aluminio como base en los MMC, pero sobre todo la adición de refuerzos cerámicos dentro de la matriz metálica de aluminio que puede mejorar las propiedades de fuerza, resistencia al desgaste y fatiga ~~comparados con la~~ ingeniería de materiales convencionales.

El mejor proceso de soldadura para ser aplicado en la unión de MMC es el de Fricción-Agitación (referida más adelante como FSW, por sus siglas en inglés, [Friction Stir Welding](#)), debido a que se obtienen ventajas sobre aquellas que son producidas por procesos de soldadura de fusión convencional, estas ventajas son: menores defectos de soldadura, mejor retención de propiedades mecánicas y menor distorsión (4). El proceso FSW exhibe un número de ventajas atractivas comparado con otros procesos de soldadura [como las mencionados anteriormente, pero](#), tal vez la más significativa, consiste en la capacidad de soldar aleaciones que son difíciles o imposibles de unir utilizando técnicas convencionales de soldadura por fusión.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Estudiar los cambios microestructurales que se generan en la unión en estado sólido entre los compuestos de matriz metálica de aluminio-carburo de silicio, después haber sido sometidos a la [variación y](#) combinación de los distintos parámetros ~~de las variables~~ utilizados a lo largo del proceso de soldadura por fricción-agitación.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Recopilar y analizar información respecto al proceso FSW aplicado a compuestos de matriz metálica.
- b) Identificar las variables independientes del proceso FSW, aplicado en compuestos de matriz metálica de aluminio-carburo de silicio.

- c) Determinar la microestructura que se encuentra presente en el material base (aluminio-carburo de silicio)~~Determinar la cantidad de las fases que se encuentran en el material base (aluminio-carburo de silicio).~~
- d) Efectuar el análisis microestructural que se genera en las zonas de la unión, después de aplicar el proceso FSW.
- e) ~~Establecer la presión adecuada ejercida en la herramienta, con el objetivo de controlar el gradiente de temperatura en la zona de soldadura, la potencia de impulso requerida y el acortamiento axial.~~

1.3 Justificación

La industria del automóvil se enfrenta actualmente a retos técnicos importantes, ya que busca mejorar la economía de combustible, reducir las emisiones de los vehículos, aumentar las opciones de estilodiseño, y mejorar el rendimiento. Para el último punto, se requieren materiales ligeros y con resistencia elevada, para ello, se consideran los MMC, y aunque no se ha contemplado el uso de fibras continuas costosas, los principales compuestos de matriz metálica de interés que han sido los más rentables, son los compuestos de aluminio reforzado discontinuamente (ARD). Por lo tanto, la aplicación del ARD para componentes de freno, especialmente rotores de frenos de disco han estado recibiendo mucha atención por las empresas del ramo automotriz. La alta conductividad térmica del aluminio reforzado con SiC (Carburo de Silicio) proporciona ventajas adicionales para la gestión térmica de los sistemas de freno. Los materiales usados para este tipo de aplicaciones serían aleaciones de aluminio reforzado con 20% de SiC.

El desarrollo de la presente monografía estará ~~enfocado~~enfocada principalmente al análisis de los cambios microestructurales que se presenten en las uniones de las piezas de trabajo de compuestos avanzados de matriz metálica

(aluminio-carburo de silicio), considerando las relaciones paramétricas aplicadas en el proceso de soldadura por fricción-agitación.

Con la información derivada del análisis se podrán determinar los parámetros de FSW adecuados para obtener las propiedades microestructurales óptimas requeridas en la unión de compuestos de matriz metálica de aluminio-carburo de silicio, en su aplicación para los componentes que conforman el sistema de frenado de los automóviles, permitiendo de esta forma, evitar la pérdida de material y disminuir los costos tanto de material como de operaciones.

1.4 Planteamiento del Problema

La limitación de los materiales MMC es su baja capacidad de soldabilidad utilizando ~~las técnicas~~ los procesos de soldadura ~~de por~~ fusión convencionales, tales como, ~~Gas Inerte de Tungsteno~~ Soldadura de Arco por Tungsteno y Gas (referido como ~~TIG~~ TIGTAW, por sus siglas en inglés), Soldadura de Arco de Metal y Gas ~~Gas Inerte de Metal~~ (referido como ~~GMAW~~ MIG, por sus siglas en inglés), haz láser y de electrones, lo cual provoca mayores modificaciones microestructurales en la soldadura, tales como reacciones de interfaz entre la matriz y las partículas, segregación de partículas, etcétera, mismas que afectan considerablemente sus propiedades mecánicas, además, con el uso de procesos de soldadura cuyo efecto es fundir el material, pueden llegar a degenerarlo y por consecuencia destruyen el efecto de los refuerzos cerámicos.

En los últimos años, el proceso FSW se ha expandido desde su origen llegando a ser uno de los procesos más populares de unión en estado sólido, principalmente para los MMC.

El proceso FSW involucra interacciones complejas entre una gran variedad de procesos simultáneos termomecánicos. Dichas interacciones afectan la

velocidad de ~~calor~~-calentamiento y enfriamiento, la deformación plástica y su flujo, el fenómeno de recristalización dinámica y la integridad mecánica de la unión. Una característica única de esta técnica de soldadura es que el transporte del calor es apoyado por el flujo plástico del sustrato cercano de la herramienta giratoria. La transferencia de calor y de masa depende de las propiedades del material, tanto como las variables de soldadura que incluyen las velocidades de rotación, de soldadura, de la herramienta y su geometría. En este tipo de técnica de soldadura, la unión de las piezas de trabajo se obtiene mediante la extrusión y la forja del metal a una alta velocidad de deformación. Es evidente que el flujo plástico debe figurar en el proceso de soldadura, así como también debe ser considerado el comportamiento de los MMC a altas velocidades de deformación, el comportamiento de recristalización dinámica y los efectos del calentamiento y enfriamiento.

1.5 Aportación Tecnológica

La aportación tecnológica será la edición de un documento donde se indiquen los parámetros adecuados que se requieren aplicar en el proceso FSW, y de esta forma obtener uniones con propiedades mecánicas adecuadas en los compuestos avanzados de matriz de aluminio reforzado con partículas de carburo de silicio.

~~El presente documento será utilizado con la finalidad de proporcionar información detallada acerca de la metodología a seguir para la aplicación de los parámetros de FSW, usando las variables adecuadas para obtener las propiedades mecánicas requeridas en la unión de los componentes de material de compuestos de matriz de aluminio con refuerzo de carburos de silicio.~~

Esta monografía contempla información referente a las variables independientes, la presión adecuada ejercida en la herramienta para controlar el gradiente de temperatura, potencia de impulso, acortamiento axial y las variables más importantes en el proceso FSW, a fin de obtener las propiedades necesarias en la unión de componentes de compuestos de matriz de aluminio con refuerzo de carburo de silicio.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 Soldadura por Fricción – Agitación

El proceso FSW fue inventado en el Instituto de Soldadura de Inglaterra (TWI por sus siglas en inglés) en el año de 1991, como una técnica de unión de materiales en estado sólido y fue aplicada principalmente para las aleaciones de aluminio, así mismo, se ha implementado en una amplia variedad de industrias

tales como la aeroespacial, automotriz, ferrocarrilera y marítima. Este proceso de soldadura exhibe un número de ventajas atractivas comparándolo con otras técnicas de soldadura. Una de las características más importante es la habilidad de soldar aleaciones que son difíciles o imposibles de unir utilizando técnicas convencionales de soldadura por fusión. Esta técnica de soldadura se lleva a cabo en la fase sólida, a temperaturas abajo del punto de fusión del material, y el resultado no experimenta problemas relacionados con la re-solidificación, tal como la formación de segundas fases, porosidad, fragilización y agrietamiento. Así mismo, la baja temperatura del proceso permite realizar la unión con distorsiones más bajas y esfuerzos residuales más bajos. Este proceso de soldadura se considera como un desarrollo muy significativo en la unión de metales en las últimas décadas, así mismo, es una tecnología que no afecta al medio ambiente debido a su eficiencia de energía. Además, en comparación con otros métodos de soldadura, en el proceso FSW no se utiliza consumibles tales como gas protector o fundente, además, durante la soldadura no se crean emisiones nocivas. Este proceso de soldadura no involucra material de aporte y no se presenta fusión alguna, cualquier aleación de aluminio se puede unir sin problemas por la compatibilidad de la composición o agrietamiento por solidificación. También cabe considerar que las aleaciones de aluminio disímiles y compuestos se pueden unir con igual facilidad. En la Tabla 2.1 se muestran beneficios adicionales en comparación con los métodos de soldadura por fusión (1).

Tabla 2.1 Beneficios del proceso FSW. (1)

Beneficios Metalúrgicos	Beneficios Ambientales	Beneficios Energéticos
<ul style="list-style-type: none"> • Proceso en fase sólida. • Baja distorsión. • Buena estabilidad dimensional. 	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere gas protector. • Requiere mínima limpieza superficial. 	<ul style="list-style-type: none"> • El uso de materiales mejorados permite una reducción en el peso.

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: Justificado, Espacio Después: 0 pto

- | | | |
|---|--|--|
| • No hay pérdida de elementos de aleación. | • Elimina los residuos de rectificando. | • Solo usa 25% de la energía necesaria para una soldadura láser. |
| • Excelentes propiedades mecánicas en el área de unión. | • Elimina solventes requeridos para desengrasar. | • Disminución del consumo de combustible de las aplicaciones en aviones ligeros, automotrices y navales. |
| • Microestructura fina recristalizada. | • Ahorro de materiales consumibles, tales como alambre o cualquier otro gas. | |
| • Ausencia de grietas por solidificación. | • No hay emisiones nocivas. | |
| • Suelda todas las aleaciones de aluminio. | | |

Con formato: Normal, Sangría: Izquierda: 0 cm

2.1.2.12.1.1.1 Principios de Operación

El proceso FSW consiste en una herramienta rotativa diseñada especialmente con un pin y un hombro el cual es insertado dentro del borde de las piezas de trabajo, generando calor a través de la fricción y deformación plástica mientras atraviesa por medio de la línea de unión. Las variables de entrada incluyen la velocidad de rotación de la herramienta, velocidad de soldadura, profundidad de inmersión, ángulo de inclinación, ángulo de inclinación hacia los lados, geometría y características del hombro (1). En la Figura 2.1 se muestran las partes que intervienen en dicho proceso. Así mismo, en la Figura 2.2 ~~y en la Figura 2.3~~ se muestran las fotografías detalladas de los elementos FSW.

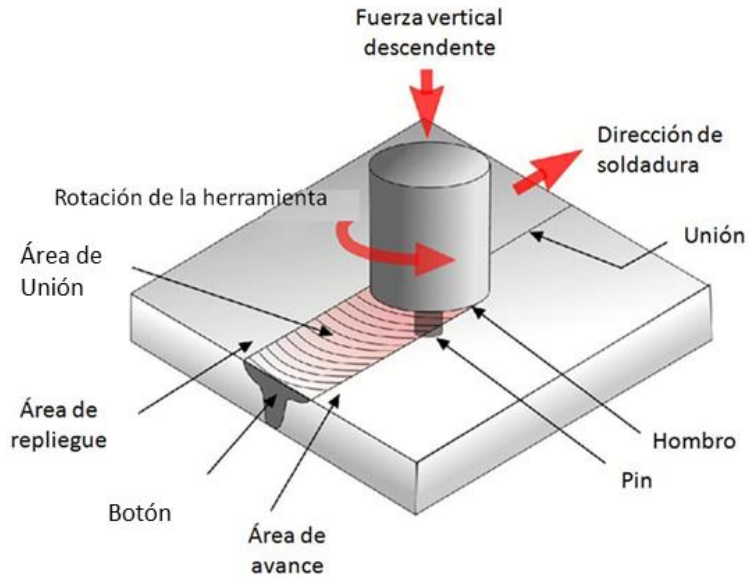


Figura 2.12.4 Proceso FSW. (1)

Código de campo cambiado

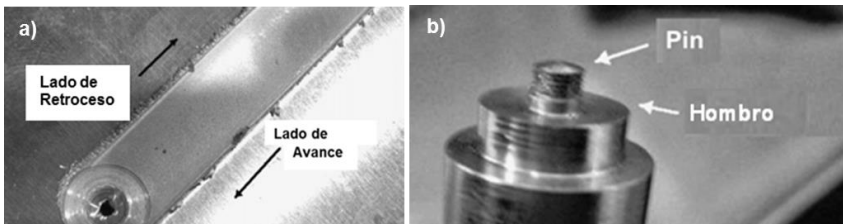


Figura 2.22.2 FSW aplicado entre dos láminas de aluminio y b) herramienta con pin de rosca FSW aplicado entre dos láminas de aluminio. (1)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Figura 2.3 Herramienta con pin de rosca. (1)

misma que la de la dirección del hombro. La herramienta sirve principalmente para tres funciones, las cuales son:

- a. Generar el calor en la pieza de trabajo.
- b. Producir el movimiento del material para efectuar la unión.
- c. Contener el metal caliente debajo del hombro de la herramienta.

El calor en el proceso FSW es producido por la interacción de la pieza de trabajo, la rotación del pin y el hombro de la herramienta, además de considerar que también se genera deformación plástica en la pieza de trabajo. El calor generado por la fricción y la deformación plástica inducidos por la herramienta de rotación en la zona soldada, crea una estructura de granos recristalizada (1).

La terminología básica para describir el proceso FSW se le atribuye a Threadgill, quién realizó la clasificación de las zonas de soldadura describiendo tres regiones principales y una región especial en las secciones cruzadas de las uniones de la soldadura, las cuales son:

- a. Material Principal.
- b. Zona Afectada por el Calor (referida como HAZ, por sus siglas en inglés).
- c. Zona ~~Afectada~~-Termo-Mecánicamente Afectada (referida como TMAZ, por sus siglas en inglés).
- d. Botón de Soldadura.

Las uniones por este proceso de soldadura tiene una región que es afectada solamente por el calor, conocida como la Zona Afectada por el Calor. La región "Material Principal", que no es afectada por el calor ni por la deformación. La región que es afectada tanto por el calor como la deformación y es llamada como

la Zona Afectada-Termo-Mecánicamente Afectada (TMAZ, por sus en inglés, Thermo-Mechanically Affected Zone). En la soldadura de ciertos materiales, la TMAZ no puede ser completamente recristalizada. En este caso, existe una región especial dentro de la TMAZ llamada “Botón de Soldadura”, en la cual todo el material es recristalizado. Otro término para nombrar al “Botón de Soldadura” es la Zona Recristalizada Dinámicamente (referido como DRX o DXZ, por su abreviación en inglés) (1). En la Figura 2.4 se muestran las zonas que se presentan en el metal base al efectuar el proceso SFSW.



Figura 2.3342-4 Esquema de la sección transversal de una soldadura efectuada por FSW en la que se muestra 4 zonas distintas: (A) Metal Base, (B) Zona Afectada por el Calor, (C) Zona Afectada-Termo-Mecánicamente Afectada y (D) Zona Agitada o Botón de Soldadura. (1)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Este proceso de soldadura se aplica a una variedad de configuración de uniones, pero las más utilizadas son junta a tope cuadrada, junta de traslape y junta en T.

En otras de las configuraciones de uniones se incluyen soldadura de tubería, soldadura hemisférica, soldadura de traslape múltiple, soldadura de doble junta en T, soldadura en esquinas y soldadura de filete. En la Figura 2.5 se muestran los tipos de configuraciones más comunes en este tipo de proceso de soldadura.

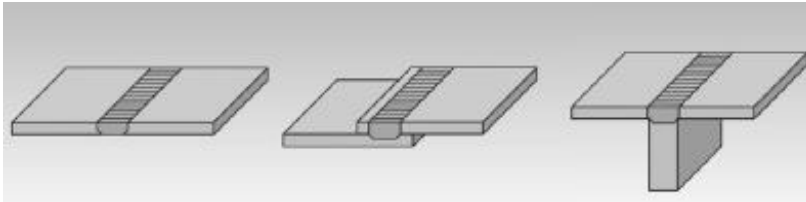


Figura 2.4452-5 Tipos de juntas comunes: tope cuadrado, traslape y unión en T. (1)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

2.1.2.52.1.1.3 Diseño de la Herramienta

El diseño de la herramienta es uno de los factores más importantes que se tienen que considerar cuando se diseña el proceso de unión por FSW. Existen diferentes características del material que pueden considerarse en la fricción-agitación, las cuales dependen del material de la pieza de trabajo, la vida útil de la herramienta, de la experiencia y preferencias del usuario.

La herramienta ejecuta muchas funciones, incluyendo la generación del calor, la desaparición de la línea de unión, dispersión de capas de óxido, creación de la presión de forja, contiene al material en la unión, evitando de este modo la chispa de soldadura en la superficie y evitando la formación de defectos tales como hoyos de gusano, adelgazamiento de la lámina o conexiones.

También es necesario considerar que la geometría de la herramienta debe facilitar una fuerza estable o esquema del control del torque y ser compatible con un rango de profundidades de inmersión. En la Figura 2.6 se muestra un ejemplo de un a) hombro y un b) pin cilíndrico.

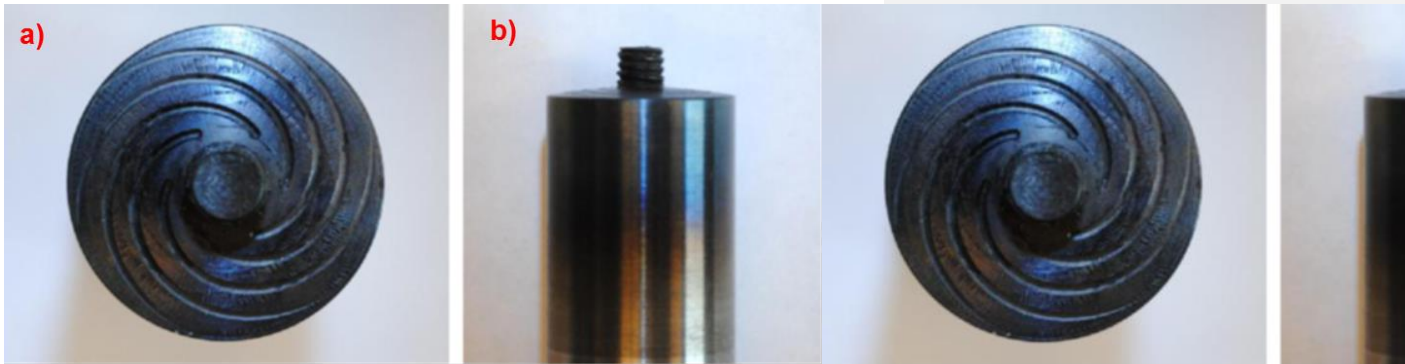


Figura 2.556.2.6 Herramienta con a) hombro esférico enrollado y pin cilíndrico roscado. (1)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Las primeras aplicaciones del proceso FSW se realizaron en la unión de aleaciones no ferrosas, tales como el aluminio, magnesio y cobre.

Cuando esta técnica de soldadura comenzó a aplicarse en la unión de metales con mayor punto de fusión y alta dureza tales como acero, titanio y súper aleaciones basadas en níquel o compuestos de matriz metálica, fueron necesarios avances significativos en los materiales de herramientas ~~fueron necesarios~~, principalmente para mitigar el desgaste de la misma.

Las herramientas de acero son las más comunes para el uso en el proceso FSW en la aplicación de aleaciones de aluminio.

Con formato: Fuente: (Predeterminada) +Cuerpo (Calibri), Color de fuente: Automático

Con formato: Normal, Izquierda, No conservar con el siguiente

Material	Espesor		Material de la Herramienta
	mm.	in.	
Aleaciones de Aluminio	<12	<0.5	Herramienta de acero, WC-Co
	<26	<1.02	MP 159
Aleaciones de Magnesio	<6	<0.24	Herramienta de acero, WC
Cobre y Aleaciones de Cobre	<50	<2.0	Aleaciones de Níquel, PCBN, Aleaciones de Tungsteno

	<11	<0.4	Herramienta de acero
Aleaciones de Titanio	<6	<0.24	Aleaciones de Tungsteno
Aceros Inoxidables	<6	<0.24	PCBN, Aleaciones de Tungsteno
Aceros de Bajo Carbono	<10	<0.4	WC, PCBN
Aleaciones de Níquel	<6	<0.24	PCBN

Fernández, Murr y Prater-(1) han caracterizado la influencia de los parámetros del proceso FSW en el desgaste de la herramienta al soldar los MMC, llegando a la conclusión de que el desgaste es directamente proporcional a la velocidad de rotación y la distancia soldada pero inversamente proporcional a la velocidad de desplazamiento. (5)

2.1.2.5.12.1.1.3.1 Diseño del Hombro

El hombro de la herramienta es diseñado para producir el calentamiento en la superficie y en las regiones de las sub-superficies de la pieza de trabajo.

Esta parte de la herramienta es la encargada de generar la mayoría del calentamiento de deformación y fricción en las piezas de trabajo delgadas, mientras que el pin produce la mayoría del calentamiento en las piezas de trabajo gruesas.

Otra de las funciones del hombro es la de producir la acción de forjado necesaria para la consolidación de la soldadura. En la Figura 2.7 se muestran diferentes tipos de hombros.

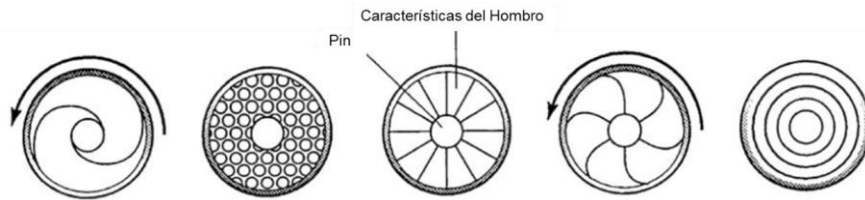


Figura 2.667-2.7 Diferentes tipos de hombro utilizados para mejorar el flujo de material y eficiencia del hombro. (1)

Código de campo cambiado
 Con formato: Fuente: Sin Negrita

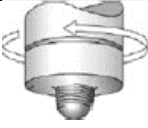


2.1.2.5.22.1.1.3.2 Diseño del Pin

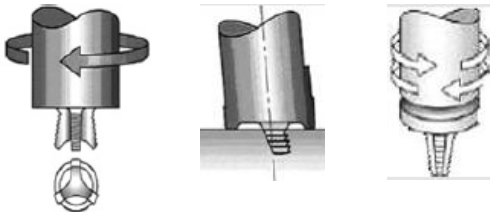
Como se menciona anteriormente, el pin para fricción-agitación genera calentamiento de deformación y fricción en las superficies de la unión.

El pin es diseñado para interrumpir el contacto con la superficie de la pieza de trabajo, material de cizalla en frente de la herramienta y mover el material detrás de la herramienta.

En adición, la profundidad de deformación y la velocidad del desplazamiento de la herramienta dependen del diseño del pin.

En la Tabla- 2.3 se muestran algunas de las herramientas diseñadas por TWI.

Herramienta	Cilíndrico	Espiral	Estriado
Figura			

Forma del pin	Cilíndrico con rosca	con	Cónico con rosca	con	Enroscado, cónico con tres estrías.
Relación de volumen del pin y volumen cilíndrico del pin	1		.4		.3
Relación volumen de barrido y volumen del pin	1.1		1.8		2.6
Aplicación de reversión rotatoria	No		No		No
Figura					
Forma del pin	Tres estrías con estrías ensanchadas en los extremos	Cilíndrico inclinado con rosca.	Cónico con rosca	con	
Relación de volumen del pin y volumen cilíndrico del pin	.3	1	.4		
Relación volumen de barrido y volumen del pin	2.6	Depende del ángulo del pin	1.8		
Aplicación de reversión rotatoria	No	No	Si		

Con formato: Normal, Sangría: Izquierda: 0 cm

2.1.2.5.52.1.1.3.3 Herramienta Súper Abrasiva

Las herramientas súper abrasivas están elaboradas de materiales formados bajo extrema temperatura y presión. Los dos tipos de súper abrasivos que se utilizan en el proceso FSW son el diamante policristalino (PCD) y el nitruro de boro cúbico policristalino (PCBN), siendo que ambos materiales consisten en

pequeños cristales de material ultra duro unido junto a un esqueleto de matriz con un material de segunda fase, que sirve como catalizador para la formación de la matriz. La herramienta de diamante policristalino se ha utilizado para unir AMC (siglas en inglés de compuestos de matriz de aluminio) reforzados con partículas de carburo de silicio, carburo de boro o alúmina (6).

2.1.32.1.2 Variables del Proceso

Las variables independientes que se utilizan para controlar el proceso FSW son:

- a. Velocidad de soldadura.
- b. Velocidad de rotación de la herramienta.
- c. La presión vertical de la herramienta.
- d. El ángulo de inclinación de la herramienta.
- e. El diseño de la herramienta.

Por otro lado, en el proceso FSW se presentan variables que dependen de las variables mencionadas anteriormente. Las variables dependientes son (1):

- a. Velocidad de generación del calor.
- b. Campo de la temperatura.
- c. Velocidad de enfriamiento.
- d. Fuerza en dirección sobre el eje x.

e. Torque.

f. Potencia.

Es importante mencionar que la temperatura aumenta con el incremento de la velocidad de rotación de la herramienta y disminuye ligeramente con la velocidad de soldadura. La temperatura aumenta también al incrementar la presión en la herramienta. En la Figura 2.8 se muestra un aumento en la temperatura con el incremento en la velocidad de rotación.

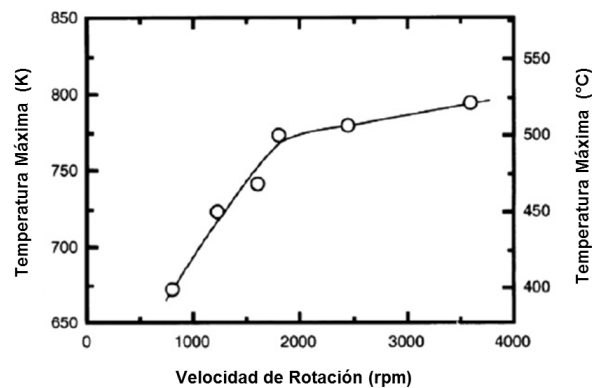


Figura 2.7782-8 Aumento de temperatura al incrementar velocidad de rotación. (1)

Código de campo cambiado

Mientras se aplica el proceso FSW, el torque depende de distintas variables tales como, la presión vertical, el diseño de la herramienta, el ángulo de inclinación, cizallamiento en la interfase del material de la herramienta, el coeficiente de fricción y el grado de deslizamiento entre la herramienta y el material base. Los valores del torque pueden proporcionar una idea sobre el flujo promedio de la tensión cerca de la herramienta y el grado de deslizamiento entre la herramienta y la pieza de trabajo para ciertas condiciones de soldadura, mientras que otras variables se mantienen constantes.

El torque disminuye con el incremento de la velocidad de rotación de la herramienta debido al incremento de la velocidad de generación de calor y la temperatura cuando las otras variables se mantienen constantes. Es fácil para el material fluir a elevadas temperaturas y velocidades de deformación. Sin embargo, el torque no es significativamente afectado por el cambio en la velocidad de soldadura. La velocidad relativa entre la herramienta y el material es influenciado principalmente por la velocidad de rotación. Por lo tanto, la velocidad de generación del calor no es afectada por la velocidad de soldadura. Elevadas velocidades de desplazamiento tienden a reducir la entrada de calor y la temperatura. El torque aumenta ligeramente con el incremento de la velocidad de desplazamiento debido a que el flujo del material se convierte en algo más difícil a temperaturas ligeramente bajas. El torque en la herramienta se utiliza para calcular la potencia requerida de $P = \omega M$, donde M es el torque total en la herramienta.

La fuerza excesiva en la dirección del eje x puede ser un indicador de potencial importante para la erosión de la herramienta y en algunos casos, puede ocasionar que la herramienta se fracture. La presión axial también puede afectar en la calidad de la soldadura. Una elevada presión conlleva al sobrecalentamiento y adelgazamiento de la unión mientras muy bajas presiones conducen a generar calor insuficiente y a la creación de huecos. El requerimiento de la potencia también aumenta con el incremento de la presión axial (7).

El proceso FSW cumple con la función de producir soldaduras con gran resistencia a la tensión y ductilidad, elevada ~~la~~ resistencia a la fatiga y mejora la tenacidad a la fractura. Las siguientes propiedades obtenidas por este tipo de soldadura se encuentran en función de las variables controladas y las variables no controladas, así como también las condiciones externas:

- a. Velocidad de soldadura de la herramienta. Influencia total de la entrada de calor.

- b. Velocidad de la rotación de la herramienta. Influencia total de la entrada de calor.
- c. Diseño de la herramienta. Diámetro del hombro, hombro cóncavo, características del pin y longitud del pin.
- d. Inclinação de la herramienta. Depende del diseño del hombro de la herramienta, típicamente es de 0° a 3°.
- e. Espesor del material. Influencia en la velocidad de enfriamiento y gradiente de temperatura a través del espesor.
- f. Composición de la aleación. Los parámetros de soldadura no se transfieren de una aleación de aluminio a otra.
- g. Temperatura inicial del material. Influencia en la respuesta del material.
- h. Velocidad de enfriamiento. Enfriamiento pasivo o activo.
- i. Disipación de calor. Conductividad térmica de los materiales en contacto con la soldadura, por ejemplo, un sistema de sujeción.
- j. Tamaño de la muestra de prueba, posición y orientación. Donde la muestra es seccionada de la soldadura, especialmente a través de la orientación del espesor y longitudinal contra la sección de desplazamiento.
- k. Diseño de la unión. Traslape, tope y filete.

- l. Tratamiento térmico post soldadura. Depende de la composición de la aleación y temperatura antes de la soldadura.
- m. Sistema de prueba FSW. Especifica las características para cada sistema, por ejemplo, desviación del eje, disipación del calor a través del eje, sujeción, etc.
- n. Tiempo entre FSW y la prueba, que es naturalmente envejecimiento a temperatura ambiente: Para las aleaciones de aluminio 2xxx, la zona de soldadura se estabiliza a temperatura ambiente en pocos días. Las aleaciones de aluminio 5xxx no envejecen naturalmente. Las aleaciones de aluminio 6xxx envejecen naturalmente más lento que las aleaciones 2xxx, y se necesitan más de cuatro semanas para que la soldadura se estabilice. Para las aleaciones de aluminio 7xxx, la zona de soldadura no se estabiliza sin un calentamiento después de la soldadura (6).

2.1.42.1.3 Aplicaciones del proceso FSW

Una de las primeras implementaciones del proceso FSW fue en la industria aeroespacial en el año de 1998, cuando la NASA comenzó a desarrollar los procesos para el uso de un tanque externo en un transbordador espacial. Este proceso de soldadura ha ganado rápidamente la aceptación como un reemplazo de tecnología en la manufactura de estructuras ende aviación. Esta técnica permite la reducción en partes, tiempos de ciclos reducidos, mayor resistencia en la unión y bajos costos de manufactura. En general, este proceso de soldadura se emplea en varias industrias, tales como la aeroespacial, automotriz, ferroviaria y marítima (1).

2.2 Materiales Compuestos

2.2.1 Conceptos Básicos

Se le denomina material compuesto a la combinación de dos o más materiales distintos, que tienen una interfaz que ~~se los~~ diferencia entre ellos. Actualmente, los materiales compuestos son optimizados a fin de lograr un balance en lo que a propiedades se refiere encaminados a cierta variedad de aplicaciones (8).

En base a la información anterior, se podría mencionar que existe un rango de materiales realmente amplio que entra en la clasificación de materiales compuestos. En términos prácticos, los materiales compuestos son aquellos en los que se emplea una matriz continua que une y da como resultado a un constituyente de refuerzo que es más rígido y fuerte, por lo tanto, el material resultante adquiere un balance de propiedades estructurales superiores a cada uno de los materiales constituyentes de forma individual (9).

Los materiales compuestos se dividen en dos clasificaciones distintas; siendo el primer nivel de clasificación, básicamente aquel que respecta al constituyente de la matriz. En las clases más amplias entran los materiales compuestos de matriz orgánica (OMC's siglas en inglés) y materiales ~~de~~ compuestos de matriz metálica (MMC's siglas en inglés). En el caso de los OMC's comprende dos clases de compuestos materiales específicamente: compuestos de matriz polimérica (PMC's siglas en inglés) y materiales compuestos de matriz de carbono, que comúnmente son formados por los PMC's en los que se emplean pasos adicionales de carbonización y densificación sobre la matriz polimérica original. En cuanto al segundo nivel de clasificación, hace referencia a la forma de refuerzo, en el que se consideran distintos tipos, tales como partículas, whiskers, fibra continua y compuestos tejidos. Como se ha mencionado anteriormente, la finalidad del refuerzo es ~~básicamente~~ mejorar las propiedades

mecánicas del material, sin embargo, se tiene que considerar que para obtener un incremento real, generalmente debe existir una fracción de volumen del refuerzo, siendo este aproximadamente de 10 % o más (9).

2.3 Compuestos de Matriz Metálica

La definición de los compuestos de matriz metálica (MMC) podría describirse como un sistema de materiales formados por una mezcla o combinación de dos o más constituyentes diferentes en base a su forma y composición química (10). El propósito principal de los MMC es el de incorporar una segunda fase de alto desempeño en un material convencional de ingeniería, para producir una combinación con características que no pueden obtenerse a partir de los constituyentes individuales (11).

Las ventajas de desempeño que poseen los MMC son su la adaptabilidad de las propiedades mecánicas, físicas y térmicas; las cuales incluyen baja densidad, alta resistencia, alta conductividad térmica, buena respuesta a la fatiga, control de expansión térmica, alta resistencia a la abrasión y al desgaste. De acuerdo a las propiedades mencionadas anteriormente, los MMC han encontrado una aplicación directa en la industria automotriz, aeroespacial, militar, electrónica y además en la industria de equipos deportivos de alto desempeño.

Los materiales metálicos de utilización más frecuente para la fabricación de los MMC son las aleaciones ligeras de aluminio (Al), titanio (Ti) y magnesio (Mg), siendo las aleaciones de aluminio (Al) las de mayor consumo debido a su bajo costo, baja densidad, buenas propiedades mecánicas, alta resistencia a la degradación ambiental y fácil manejabilidad. Por lo anterior, la mayor parte del trabajo comercial sobre los MMC se ha enfocado principalmente en el aluminio como la matriz metálica. La combinación de peso ligero, resistencia al medio ambiente y propiedades mecánicas han hecho que las aleaciones de aluminio

sean muy populares. Estas propiedades también hacen que el aluminio sea una buena elección para ser utilizado como una matriz metálica; el punto de fusión del aluminio (660°C) es lo suficientemente alto para satisfacer muchos requisitos de aplicaciones térmicas pero lo suficientemente bajo para proporcionar un procesamiento óptimo del material compuesto (3).

Recientemente se ha demostrado la posibilidad de producir componentes complejos por el uso de compuestos de aluminio reforzado para la aplicación de diferentes métodos de procesos, permitiendo a los materiales niveles menores de daño por el control de parámetros en el proceso como temperatura y velocidad de deformación.

2.3.1 Antecedentes Históricos de MMC

Aunque el concepto de MMC es relativamente moderno, se pueden encontrar ejemplos de MMC incluso en las más antiguas civilizaciones. A modo de ejemplo, se puede citar el hallazgo en Cayonu (Turquía) de leznas de cobre que datan aproximadamente del año 7000 A.C. fabricadas por un proceso de laminación y forja sucesiva que genera una microestructura constituida por un elevado número de inclusiones no metálicas alargadas. (12)

Sin embargo, el concepto moderno del MMC surgió más recientemente. En primer lugar se desarrollaron materiales compuestos de matriz polimérica, coincidiendo con el gran impulso de materiales más ligeros y resistentes para industrias como la aeroespacial, la del transporte, la de la energía y la de construcción civil en los años 50's y 60's, se comenzó a experimentar con otro tipo de matrices, entre ellas las metálicas.

Por lo tanto, entre los años 50's y a principios de los años 60's se realizó el primer esfuerzo por desarrollar MMC. La motivación inicial en ese tiempo fue

ampliar de forma dramática la eficiencia estructural de los materiales metálicos mientras se conservaban sus ventajas, así como su inercia química, alta resistencia al corte y buena retención de propiedades aún a altas temperaturas. En primer lugar, se desarrolló la tecnología de endurecimiento por dispersión que trata, al igual que el endurecimiento por precipitación, de impedir el movimiento de las dislocaciones mediante la incorporación a la matriz de una segunda fase de muy pequeño tamaño.

En los años 60's, surgió un gran interés por los MMC reforzados con fibras resistentes en matrices de cobre y aluminio, principalmente. El primer MMC que se desarrolló fue el sistema Al-B de refuerzo continuo. Fue también el primero que se aplicó en la industria, específicamente en la lanzadera espacial estadounidense (Space Shuttle). La estructura principal del fuselaje central de este vehículo espacial está formada por 243 tubos de sección circular realizados de compuesto Al/B, lográndose con ello la reducción en peso del 44% respecto al diseño original basado en elementos extruidos de aluminio. (9)

A principios de los años 70's la recesión produjo una reducción en el presupuesto de investigación y desarrollo de los MMC, lo que trajo consigo el final de esta fase. A finales de los 70's, los esfuerzos se renovaron en este tipo de materiales reforzados con fibras discontinuas empleando whiskers de SiC, por lo que nuevamente se llegó a una era de interés en los MMC reforzados tanto con fibras continuas como discontinuas. Se demuestra entonces que los MMC tales como el Al/SiC/XXw pueden ser competitivos en cuanto a propiedades con sus competidores de fibra larga. En ese momento, el elevado precio de los whiskers de SiC frenó su aplicación, pero la puesta a punto de un proceso de fabricación de whiskers de carburo de silicio por pirolisis de la cascara de arroz hizo que fuera posible fabricarlo a escala industrial. Este abaratamiento impulsó la investigación sobre este tipo de MMC. (13)

En los años 80's, las aleaciones de aluminio con refuerzo de SiC fueron objeto de muchos programas de desarrollo por parte tanto de la industria como de los gobiernos, sobre todo en relación con sus aplicaciones aeroespaciales. En 1985, se consiguió optimizar las propiedades, superando a las que poseían otros materiales utilizados para estas aplicaciones en aquel momento. En 1986, se comercializaron por primera vez y actualmente existe ya en el mercado una amplia gama de composiciones y porcentajes de refuerzo adecuados para distintas aplicaciones.

A principios de los años 90's, la fuerza aérea de los Estados Unidos destinó un programa de investigación para mantener una tecnología de MMC encaminada a la industria aeroespacial de los Estados Unidos, que dio como resultado diversas marcas militares y comerciales para su aplicación aeroespacial, principalmente con interés en el aluminio reforzado con fibras discontinuas.

Durante el año de 1999, el mercado de los MMC para el manejo térmico y empaquetamiento electrónico fue 5 veces mayor que el aeroespacial (9).

2.3.2 Tipos de Procesamiento de MMC

El procesamiento de los MMC puede ser dividido en dos categorías de técnicas de fabricación:

- a. Estado sólido.
- b. Estado líquido.

2.3.2.1 Procesamiento en Estado Sólido

La metalurgia de polvos es el método de fabricación en estado sólido más común para la fabricación de compuestos de matriz metálica. Con la tecnología de solidificación rápida, la aleación de la matriz se produce en una forma de polvo prealeado en lugar de iniciar a partir de las mezclas elementales. Después de realizar la mezcla del polvo con partículas de refuerzos de cerámica, el prensado isostático en frío se utiliza para obtener un compacto en crudo que a continuación es completamente desgasificado y forjado o extruido.

La principal dificultad en los procesos mencionados anteriormente, es la eliminación del aglutinante utilizado para mantener unidas las partículas de polvo. Los aglutinantes orgánicos con frecuencia dejan contaminación residual que provoca deterioro en las propiedades mecánicas del material compuesto.

2.3.2.2 Procesamiento en Estado Líquido

La mayoría de las aplicaciones más viables son producidas por la técnica de procesamiento en estado líquido debido a las ventajas que posee sobre la técnica de procesamiento en estado sólido, como por ejemplo, ~~con~~ el empleo de preformas cerámicas con una porosidad controlada se obtiene una buena distribución de las partículas de reforzamiento dentro del compuesto de matriz metálica. El metal líquido es generalmente menos costoso y mucho más fácil de manipular que los polvos, y el material compuesto puede ser producido en una gran gama de formas, utilizando métodos desarrollados en la industria de la fundición para metales no reforzados. Actualmente se utilizan cuatro tipos de métodos distintos como técnicas de procesamiento en estado líquido, los cuales son los siguientes (3):

- a. Infiltración.

- b. Dispersión.
- c. Atomización.
- d. Fabricación in situ.

a) Procesamiento de Infiltración

Una de las técnicas de procesamiento en estado líquido de los MMC es el método de infiltración, en la cual se involucra un cuerpo poroso de la fase de refuerzo dentro de un molde y la infiltración de un metal que fluye a través de intersticios para llenar los poros y producir un material compuesto.

Aunque la infiltración asistida por presión es una de las técnicas que más se utilizan industrialmente, el desarrollo de técnicas de infiltración sin la aplicación de fuerzas externas es de vital importancia para abatir los costos del procesamiento. Actualmente, existe el potencial de fabricar compósitos por infiltración no asistida de preformas de partículas de SiC para aleaciones de aluminio. Sin embargo, existen ciertas barreras en el procesamiento que pueden limitar su aceptación comercial, por ejemplo, la presencia de porosidad residual en los materiales compuestos y el desarrollo de reacciones indeseables en la interfase metal/cerámico (14).

En general, la infiltración de un cuerpo poroso por un líquido se lleva a cabo por la aplicación de vacío o una fuerza para promover la penetración del líquido dentro de los poros. En la Figura 2.9 y 2.10 se muestran los diagramas de infiltración espontánea e infiltración asistida, respectivamente.

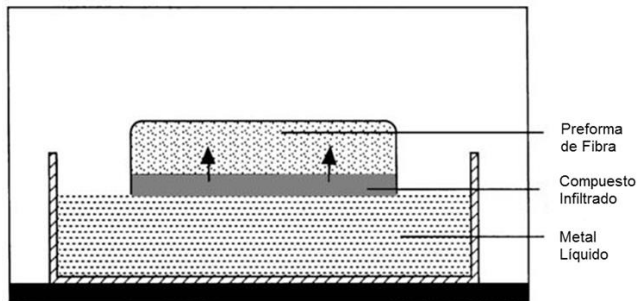


Figura 2.8892-9 Representación esquemática del método de procesamiento por infiltración espontánea. (14)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

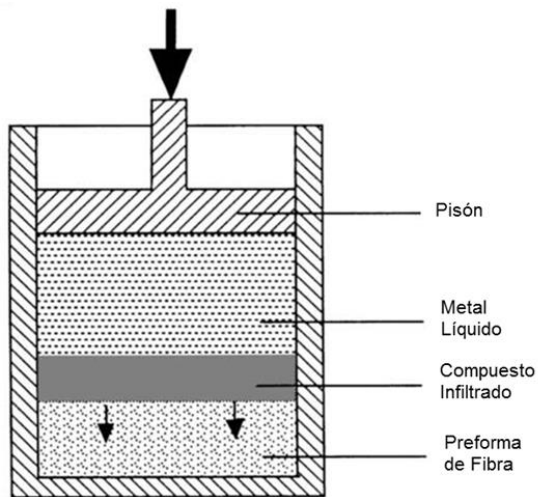


Figura 2.99102-10 Representación esquemática del método de procesamiento por infiltración asistida. (14)

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Código de campo cambiado

b) Procesamiento de Dispersión

En esta técnica de procesamiento en estado líquido, el refuerzo es incorporado en forma suelta dentro de la matriz metálica. Este método es actualmente la manera más barata de producir MMC y se presta a la producción de grandes cantidades de material, que se pueden procesar adicionalmente por medio de fundición o extrusión. El proceso de dispersión más simple usado en la actualidad es método Vórtice, que consiste en la agitación del metal líquido y la adición de partículas en el vórtice, tal y como se muestra en la Figura 2.11.

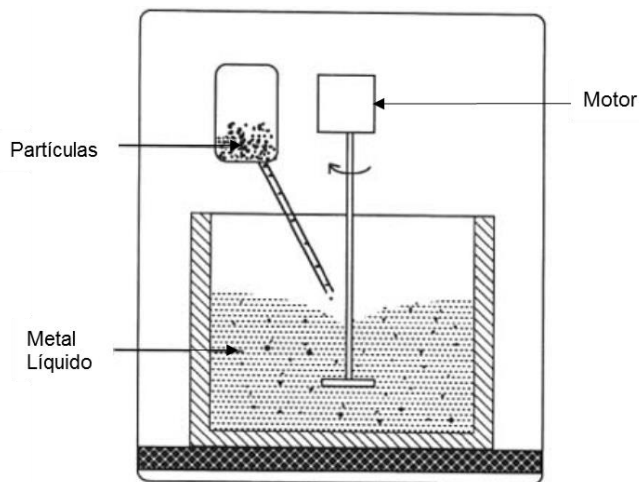


Figura 2.1040142.14 Representación esquemática del método de procesamiento por dispersión. (14)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

c) Procesamiento de Atomización

En este proceso, gotas de metal fundido son atomizadas junto con la fase de refuerzo y se recogen en un sustrato donde se completa la solidificación del metal. La mayoría de este tipo de procesos utiliza gases para atomizar el metal fundido dentro de las gotas finas. Las partículas pueden ser inyectadas dentro del flujo de las gotas o entre la corriente del líquido y el gas de atomización.

Una de las ventajas de las técnicas del proceso de atomización reside en la microestructura resultante de la matriz que cuenta con un tamaño de grano fino y baja segregación. Este proceso no es tan económico como el proceso de dispersión o infiltración, debido al costo elevado de los gases utilizados en las grandes cantidades de polvo de los residuos para su recolección o eliminación.

En la Figura 2.12 se visualiza una representación esquemática ~~a cerca~~ del procesamiento por atomización.

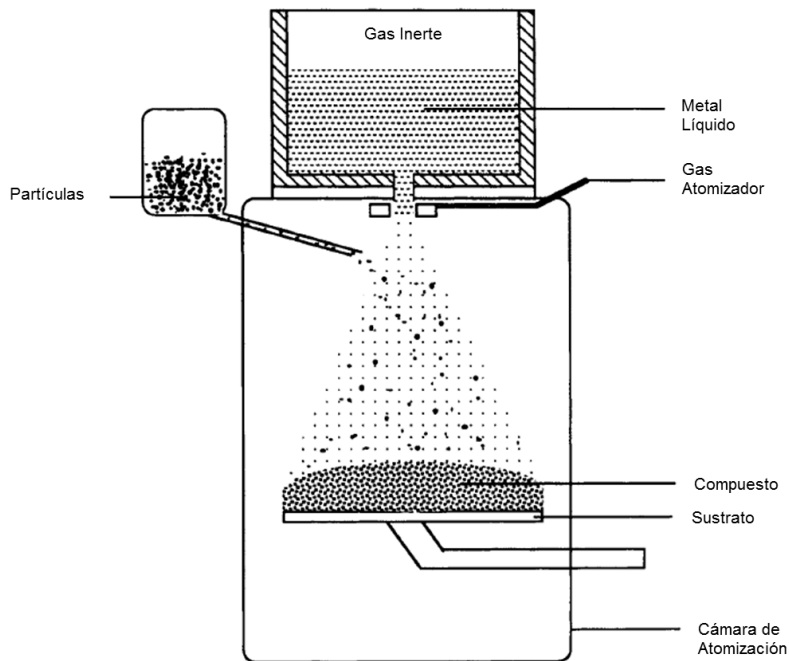


Figura 2.11412-12 Representación esquemática del método de procesamiento por atomización. (14)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

d) Procesamiento *in-situ*

Este proceso consiste en hacer reaccionar el metal fundido utilizando un gas, tal como el argón. Una de las mejores ventajas en los materiales compuestos *in situ* es que la fase de refuerzo se distribuye generalmente de forma homogénea y el espaciamiento o tamaño del refuerzo puede ser ajustado en la mayoría de los casos por la solidificación o tiempo de reacción. En la Figura 2.13 se muestra la representación esquemática del procesamiento *in situ*.

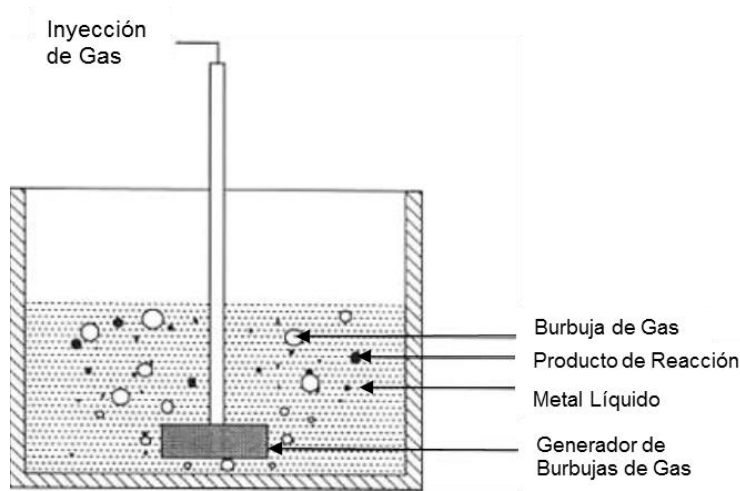


Figura 2.13 Representación esquemática del método de procesamiento *in situ*. (14)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

2.3.3 Matrices Metálicas

La matriz de un material compuesto suele ser dúctil y suele poseer un módulo elástico inferior al del refuerzo. Además, la matriz protege al refuerzo del deterioro superficial originado por la abrasión mecánica o por reacciones químicas con el medio ambiente. Por último, la matriz separa los refuerzos y, dependiendo de su plasticidad, impide la propagación de grietas de un refuerzo a otro, es decir, la matriz puede actuar como una barrera que evita la propagación de las grietas.

En general, no se suelen utilizar metales puros como matrices en los materiales compuestos de matriz metálica (MMCs), sino que suelen ser aleaciones.

La matriz metálica en los materiales compuestos cumple con las siguientes funciones:

- a. Proteger las fibras o partículas del ambiente exterior (aire, humedad, etcétera).
- b. Propiciar la unión solidaria de los elementos que constituyen el refuerzo: unir las fibras entre ellas, pero separarlas para evitar la transmisión de grietas a través del compuesto, sobre todo en el caso de un refuerzo ~~de~~ con fibras continuas.
- c. Repartir y transmitir las cargas de los elementos de refuerzo. En general, para que la transmisión sea óptima, la matriz debe deformarse plásticamente ~~hacia~~ para tensiones inferiores a las que se somete el compuesto y que su deformación sea inferior a la correspondiente a la rotura. La matriz no debe tener un módulo de elasticidad demasiado elevado.
- d. Por último, las condiciones particulares del uso del compuesto pueden exigir que la matriz presente buena resistencia a la corrosión o a la oxidación o una buena resistencia mecánica a elevadas temperaturas.

Actualmente existe un gran número de metales o aleaciones que se emplean para la fabricación de MMC, ~~así~~; las aleaciones más comunes son las matrices ligeras, tales como las del aluminio, principalmente de las series 2000, 6000, 7000 y 8000; el titanio y sus aleaciones, aunque en algunos casos presentan

problema de reacción química con el refuerzo durante el proceso de fabricación a temperaturas elevadas, siendo que esto provoca el deterioro de las propiedades del compuesto obtenido; y el magnesio y sus aleaciones, que presentan graves problemas de corrosión. En la Tabla 2.4 se muestran algunas aplicaciones en las que se emplean los MMC.

Una de las características básicas de las matrices de aleación de aluminio es que son esencialmente homogéneas y pueden presentar una estructura de grano fino una vez deformadas y recristalizadas. Por ello, el material resultante, si el refuerzo está bien distribuido, es a su vez muy homogéneo. Las limitaciones de anisotropía, normalmente asociadas a metales hexagonales compactos como magnesio, titanio y berilio, no aparecen debido a que la estructura cristalográfica de aluminio es cúbica centrada en las caras.

Actualmente, para identificar a los materiales MMC se utiliza una nomenclatura desarrollada por la Aluminum Association (USA), que ha sido adoptada por el American National Standard Institute (ANSI 35.5-1992). Según esta, el nombre de un MMC consta de cuatro partes:

- a. Designación de la aleación ~~de~~ matriz.
- b. Material reforzante.
- c. Porcentaje en volumen de refuerzo.
- d. Morfología del refuerzo.

Matriz/Refuerzo/% en volumen forma (w=Whiskers, p=Partícula, f=Fibra)

Por ejemplo, AA 2124/SiC/12.5%w describe la aleación de aluminio de denominación AA 2124 (aluminio-cobre) reforzada con un 12.5% en volumen de

carburo de silicio en forma de whiskers. En la Tabla 2.4 se muestran las aplicaciones de los MMC.

Tabla 2.4 Aplicaciones de los MMC. (14)

Fibra	Matriz	Aplicaciones
Grafito	Aluminio	Satélites, misiles y estructuras de helicópteros
	Magnesio	Estructuras de satélites
	Plomo	Placas de almacenamiento de baterías
	Cobre	Contactos eléctricos y rodamientos
Boro	Aluminio	Cuchillas de compresor y soportes estructurales
	Magnesio	Estructuras de antenas
	Titanio	Aspas de motor de avión
Alúmina	Aluminio	Cajas de transmisión
	Magnesio	Estructuras de transmisión de helicópteros
Carburo de Silicio	Aluminio	Estructuras de alta temperatura
	Titanio	Estructuras de alta temperatura
Molibdeno	Súper aleaciones	Componentes de motor de alta temperatura
	Súper aleaciones	Componentes de motor de alta temperatura
Tungsteno	Súper aleaciones	Componentes de motor de alta temperatura

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

2.3.4 Materiales de Refuerzo

El material de refuerzo es el que soporta las tensiones principales, las investigaciones suelen centrarse en fibras o partículas de excelentes características mecánicas (principalmente elevada resistencia a la tracción y/o alto módulo de elasticidad) y conservan las propiedades mecánicas, junto con la estabilidad química y compatibilidad con la matriz a temperatura elevada. Las funciones que posee un material de refuerzo en MMC son las siguientes:

- a. Soportar las tensiones que se ejercen sobre el compuesto.

- b. Aumentar las características mecánicas de la matriz metálica, su dureza y resistencia al desgaste.
- c. Mitigar los fallos ~~de estas características con~~por el aumento de temperatura.
- d. Frenar o detener la propagación de grietas a través del compuesto y desarrollo de las fisuras.

De entre los materiales de refuerzo más comunes que existen en el mercado podemos citar los refuerzos cerámicos basados en óxido de aluminio o carburo de silicio, la fibra de vidrio, las fibras de aramida, fibra de carbono, etc.

Para el caso concreto de los MMCs, los refuerzos discontinuos más empleados son el óxido de aluminio (Al_2O_3) y el carburo de silicio (SiC). Respecto a los refuerzos continuos, suelen ser de naturaleza no metálica.

El carburo de silicio (SiC), presenta una densidad ligeramente inferior al aluminio, además de que tiene un coste bajo y está disponible en una amplia gama de tamaños. Como refuerzo, produce un aumento en el módulo de Young y en la resistencia a [la](#) tracción del material compuesto¹, aumentando, además, la resistencia al desgaste. (15)

El segundo refuerzo más utilizado es la alúmina (Al_2O_3). Comparado con el SiC, es más estable e inerte, y tiene una mejor resistencia a la corrosión y un mejor comportamiento a altas temperaturas. Sin embargo, los materiales Al/ Al_2O_3 tienen, en general, una menor resistencia y ductilidad que los materiales reforzados con las mismas fracciones volumétricas de SiC, ya que la reactividad entre la matriz y el refuerzo es mayor. En la Tabla 2.5 se muestran las propiedades de los refuerzos. (13)

Tabla 2.5 Propiedades de los refuerzos. (13)

Refuerzo	d (μm)	σ_r (GPa)	E (GPa)	ν	ρ (Kg/m ³)	T_f (K)	CTE ($\omega\epsilon/\text{K}$)	C.T. (W/mK)	C.E. (J/KgK)
Al ₂ O _{3p}	1-50		430	.24	38	2313	7	~100	1050
SiCp	1-50		420- 450	.17	32	3373	4	~100	840
SiCw	.1-1	3.1	450- 480	.17	32.1	3373	4	>16	

d = Diámetro; σ_r = Resistencia a la Rotura; E = Módulo de Young; ν = Módulo de Poisson; T_f = Temperatura de Fusión; ρ = Densidad; CTE = Coeficiente de Expansión Térmica; C.E. = Calor Específico; C.T. = Conductividad Térmica.

El carburo de silicio puede fabricarse en forma de fibra (diámetro > 1 μm), de whiskers (diámetro < 1 μm) o de partícula, por pirolisis de la cascarilla de arroz. Este procedimiento fue desarrollado por las universidades de Utah y Exxon en los años 70's y su principal interés es que abarata el costo de los whiskers. El procesado y tratamiento térmico que sufren los whiskers son muy importantes, ya que condicionan en gran medida las propiedades del MMC, sobre todo en lo que se refiere a su ductilidad.

Las fibras cortas se fabrican por deposición química del vapor (CVD). Es el mismo procedimiento empleado para la fabricación de fibras continuas de SiC. En un horno tubular, se expone un sustrato de carbón pirolítico en forma de filamento, frente a hidrógeno. La reacción subsiguiente forma β -SiC sobre el sustrato.

La alúmina (Al₂O₃) puede ser de distinto tipos:

- **α Al₂O₃**: posee una estructura hexagonal y suele utilizarse en forma de partículas. Se obtienen por calcinación.

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

- **δ Al₂O₃**: se emplea para la fabricación de fibras. Las fibras de δ Al₂O₃ tienen un diámetro de 3 μ m y una relación de aspecto 50:1.

La morfología del refuerzo empleado se elige en función de las propiedades requeridas y del costo. Tanto las partículas como los whiskers proporcionan materiales más isotrópicos que las fibras, por lo que son útiles cuando se aplican esfuerzos en dos o tres dimensiones.

La morfología de refuerzo se puede clasificar en tres categorías:

- a. Fibras continuas.
- b. Fibras cortas (whiskers).
- c. Partículas.

Generalmente, y tomando en consideración las propiedades mecánicas, el mejor reforzamiento con las que éstas se pueden obtener es por medio de las fibras continuas.

En la Figura 2.14 se muestra un esquema de los tres distintos tipos de refuerzo utilizados en materiales compuestos de matriz metálica (16).

Así mismo, en la Tabla 2.6 se visualizan las propiedades de los materiales compuestos de diferentes matrices con tipos de refuerzo de fibras continuas y fibras discontinuas.

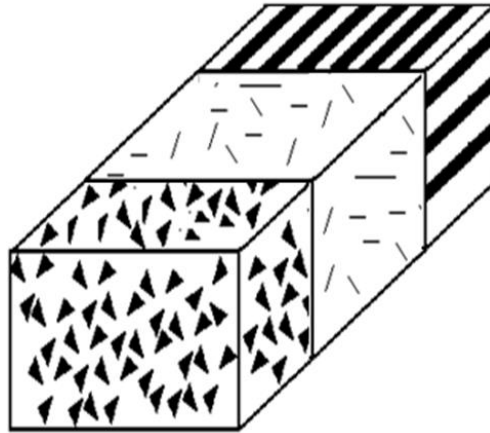


Figura 2.1313142-14 Refuerzos empleados en compuestos de matriz metálica: partículas, fibras cortas (whiskers) y fibras continuas. (16)

Código de campo cambiado
 Con formato: Fuente: Sin Negrita

Tabla 2.6 Propiedades de los materiales compuestos de diferentes matrices con tipos de refuerzo de fibras continuas y fibras cortas. (16)

Con formato: Fuente: Sin Negrita
 Código de campo cambiado

Matriz MA TRIZ	Refuerzo REFU ERZO	Fracción F RACCIÓN	Resistencia a la tracción longitudinal (MPa) RESISTEN CIA A LA TRACCIÓN LONGITUDINAL (MPa)	Módulo elástico longitudinal (GPa) MÓDULO ELÁSTICO LONGITUDINAL (GPa)
Al-7Zn	Fibra de grafito	40	90	190
Al 2024	Fibra de boro	60	1.500	270
Al 6061	Fibra de SiC	50	1.500	205
Al 2024	Al ₂ O ₃ 50	45	175	-
Al 6061	Whiskers de SiC	15	480	100
Al 6061	Partícula de SiC	15	370	100
Ti-6Al-4V	BORSIC40	90	205	-
Mg	Fibra de grafito	40	560	230
Mg	Fibra de SiC	50	1.300	230

2.3.4.1 Fibras Continuas

La aplicación de las fibras metálicas es muy poco usual a causa de su posible ataque químico por parte de la matriz, las modificaciones estructurales por el incremento de la temperatura, la posible disolución de la fibra de la matriz y la relativa oxidación de las fibras de metales refractarios (W, Mo, Nb, etc.). A causa de lo anterior, se han desarrollado fibras cerámicas, que presentan numerosas ventajas:

- a. No se disuelven en la matriz.
- b. Su resistencia se mantiene a temperaturas elevadas.
- c. Su módulo de elasticidad es alto.
- d. No se oxidan.
- e. Tienen baja densidad.

Las fibras más empleadas como refuerzo son de boro, alúmina y carburo de silicio.

2.3.4.2 Fibras Discontinuas

Estas fibras son utilizadas normalmente para la producción de MMC que son mezclas de óxidos, los cuales se comercializan en distintos diámetros, entre 3 y 5 μm . Este tipo de fibras conducen a propiedades inferiores que las fibras

continuas, por lo que su costo es más bajo. Los whiskers, son considerados como refuerzos discontinuos, tienen diámetro menor $1\ \mu\text{m}$ y pueden tener una longitud de $100\ \mu\text{m}$. Los principales whiskers disponibles comercialmente son los de SiC y Si_3N_4 . Este tipo de reforzamiento se obtiene de forma monocristalina, además de su pequeño diámetro, conducen a que tengan pocos defectos de fractura interna y como consecuencia, presentan elevados niveles de resistencia en comparación con otro tipo de fibras discontinuas, dándoles un mayor uso.

2.3.4.3 Partículas

Este tipo de refuerzo es el más barato que existe, y proporciona mejor isotropía de propiedades. El control del tamaño y la pureza son los principales requisitos para su empleo en materiales compuestos. Refuerzos típicos en forma de partículas son la mica, óxidos, tales como SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 , MgO ; carburos como TiC o B_4C ; y nitruros, tales como, Si_3N_4 . Los materiales que más comúnmente se emplean son el grafito, alúmina (Al_2O_3) y carburo de silicio (SiC). (16).

Las propiedades de los materiales resultantes son isotrópicas y suponen una mejora sustancial sobre las de los metales sin reforzar. Las partículas actúan como una segunda fase dispersa, ayudando a mantener una estructura de grano fina incluso a elevadas temperaturas. Como están uniformemente distribuidas en la microestructura, inhiben el crecimiento de grano evitando el movimiento de los límites de grano. Además, ~~pinzan-crean las~~ dislocaciones y causan apilamientos de las mismas, aumentando de forma efectiva la resistencia a la fluencia. Su disponibilidad ha hecho que se les dedique un gran esfuerzo ~~investigador para su~~ [investigación](#). Como dato más destacable, estos materiales compuestos pueden fabricarse por la mayoría de los procesos de trabajado estándar.

Las partículas de SiC son generalmente del tipo fase α SiC que, es más frágil que la fase β . Su forma es irregular, con una relación l/d menor de 2/1 y su tamaño, que condiciona muchas de las propiedades del material compuesto resultante, oscila entre 3 y 40 μm , dependiendo sobre todo del método de fabricación utilizado. En procesos pulvimetalúrgicos, se suele utilizar SiC con una relación menor de 5/1 y un tamaño entre 3-20 μm . Para los procesos en los que interviene aluminio fundido, se utilizan partículas entre 10 y 20 μm , ya que las partículas gruesas son más fáciles de incorporar al fluido, aunque un gran tamaño podría reducir una gran segregación por gravedad.

2.3.5 Materiales Compuestos Al-SiC

AlSiC es un MMC que consiste en un material con matriz de aluminio y partículas de carburo de silicio. Este compuesto tiene una elevada conductividad térmica (180 - 200 W/m K). Las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio reforzadas con partículas cerámicas, se conocen por ser influenciadas por el tamaño de las partículas y por la fracción de volumen. Arsenault, en el año de 1984 realizó varios experimentos de los cuales concluyó que, el límite de elasticidad y la resistencia a la tracción tienden a aumentar, y por otro lado, la tenacidad y la ductilidad disminuyen con el incremento de la fracción de volumen de las partículas o la disminución del tamaño de las partículas (17).

Las aleaciones de aluminio son una de las familias de materiales más utilizadas como matrices en los MMC, tanto en los estudios de investigación, como en los procesos industriales, debido principalmente a sus propiedades, entre las que cabe destacar, baja densidad, bajo costo en comparación con el de otras aleaciones de baja densidad (como magnesio y titanio), buenas propiedades específicas y buena resistencia a la corrosión y al desgaste.

De todas las aleaciones de aluminio, las aleaciones endurecibles son las especialmente adecuadas para los MMC, siendo las más utilizadas las series 2XXX (Al-Cu-Mg), 6XXX (Al-Mg-Si) y 7XXX (Al-Zn-Mg).

Las aleaciones 2XXX (el principal aleante es el cobre, aunque también contienen magnesio) ~~son endurecibles~~ se pueden endurecer por precipitación, siendo que la adición de magnesio a las aleaciones de aluminio-cobre aceleran e intensifican el endurecimiento por envejecimiento. La aceleración de este proceso por la adición de magnesio resulta de interacciones complejas entre las vacancias y los dos solutos. El envejecimiento de la aleación 2024-T4 a elevadas temperaturas, produce la transición de la fase S' (Al₂CuMg). Pequeñas cantidades de magnesio endurecen significativamente las aleaciones de aluminio-cobre incluso cuando ninguna evidencia de S' ha sido detectada después de los tratamientos térmicos de precipitación. Esta aleación ~~y se pueden~~ mejorar sus características por envejecimiento combinado con la deformación en frío. (18)

~~El carburo de silicio (SiC) es uno de los refuerzos cerámicos más utilizados para las matrices de aluminio y sus aleaciones. El SiC se ha utilizado como material industrial desde el siglo XX. Es un material cerámico estructural importante debido a su combinación única de propiedades, una excelente resistencia a la oxidación, alta resistencia a elevadas temperaturas y al desgaste, alta conductividad térmica y una buena resistencia al cambio térmico.~~

Comentado [YA1]: Este párrafo está de más, ya que con anterioridad mencionaste que el SiC es uno de los refuerzos más utilizados. En la sección de refuerzos hablaste de ello.

2.4 Aplicación de los MMC

La metalurgia actual tiende a producir materiales metálicos de características mecánicas más elevadas, con el fin de ~~que, al ser necesario utilizar~~ menos material para fabricar una determinada pieza, ~~se pueda lo que puede~~ conseguir un ahorro de costos y de peso. Por ello, la tecnología de fabricación de materiales compuestos de matriz metálica se está extendiendo gradualmente a la aplicación industrial. Las partículas de refuerzo son especialmente interesantes para la industria. De todos modos, para que la industria acepte estos nuevos materiales por completo, tienen que cumplir una serie de requisitos en cuanto a eficacia, calidad y costo.

Los MMC son una clase de materiales con aplicaciones en estructuras avanzadas, aeroespacial, automotriz, electrónica, gestión térmica y desgaste.

A parte del desarrollo de los productos aeroespaciales, varias industrias han logrado producir MMC a bajo costo. Estos desarrollos han proporcionado las bases necesarias para las aplicaciones de producción a gran volumen de los MMC. Los avances de producción incluyen los siguientes puntos:

- a. Desarrollo de pistones reforzados y monoblocks de motor utilizando la tecnología de infiltración en una producción en masa efectuada por Toyota y Honda, respectivamente.

- b. Procesos de deposición por atomización para la producción de lingotes y productos de MMC, por Alcan.
- c. Producción por Lanxide vía directa de oxidación del metal e infiltración sin presión de los MMC resistentes al desgaste y componentes de embalaje electrónico.
- d. Desarrollo de producción con capacidad a gran escala para MMC comerciales para fundición. (Alcan, Duralcan Co., Hydro Aluminium Co., BP, Alcoa).

2.4.1 Estructuras Aeroespaciales y Aeronáuticas

La principal ventaja en este tipo de aplicaciones es la reducción del peso, que permite mayor capacidad de carga o ahorro de combustible. Esto es muy importante en la industria aeroespacial, donde se dice que un kilo de material puesto en órbita vale su peso en oro.

El aluminio reforzado con fibras de boro (Al/B) fue el primer MMC que se desarrolló a finales de los años 60 y fue el primer MMC empleado en una aplicación industrial, concretamente en la lanzadera espacial estadounidense "Space Shuttle". Del compuesto Al/C, existe un elemento operativo en el telescopio espacial "Hubbel". El original era de epoxi/C, lográndose con el Al/C una reducción de peso del 70% y manteniendo la misma estabilidad térmica.

Este ahorro de peso también es importante en la industria aeronáutica. En 1980, el 55% de los costes directos de explotación de una compañía aérea se debían al combustible, lo que subraya la importancia que puede tener este ahorro. Para este tipo de aplicaciones, se suele utilizar refuerzo de whiskers, debido a sus mayores prestaciones.

Algunos ejemplos concretos son las aeronaves transatmoféricas (Orient Express) y supersónicas, aún en diseño, previstas por la OST (Oficina de Ciencia y Tecnología (EE.UU.)). Estos aviones utilizarán Al/SiC en las partes más frías como el tren de aterrizaje o los depósitos de combustible. (13)

2.4.2 Aplicaciones de Presión.

Sistemas de guía de misiles, donde los componentes deben tener un peso reducido, ser estables dimensionalmente y de CTE compatible con otras piezas, ya que son elementos de precisión. En este caso, se suelen utilizar refuerzos de partículas. (13)

2.4.3 Óptica.

Espejos ópticos metálicos para sistemas de detección de infrarrojos y sistemas de láser. Los MMC proporcionan estructuras de bajo peso y alta estabilidad dimensional. Algunas de estas estructuras como el espejo de infrarrojos del Tanque Táctico o el Telescopio Espacial Ultraligero (OLW) deben funcionar en condiciones extremas físicas y mecánicas.

En un principio, los MMC de refuerzo discontinuo se diseñaron para aplicaciones, como las anteriormente mencionadas, en las que el coste del producto no era un factor determinante; pero su abaratamiento ha permitido que actualmente hayan desbordado estos campos y se comienzan a aplicar en sectores más comerciales, como la industria del automóvil (81) o los equipos de deporte (cuadros de bicicleta y mástiles para barcos de competición). La dificultad que presentan actualmente es que los componentes deben ser fabricados en una sola pieza y con su forma final, ya que aún está por desarrollar una técnica de soldadura adecuada. (13)

2.4.4 Equipos Deportivos.

Las principales aplicaciones en este campo son los cuadros y suspensiones de las bicicletas (85). Muchas compañías que fabrican materiales compuestos, como Duralcan y DWA Composite Specialties, Inc. Chatsworth, Calif tienen un gran interés en esta aplicación. Por ejemplo, Duralcan es el proveedor del cuadro de la bicicleta Stumpjumper M2, fabricada por Specialized Bicycle Components, mc, Morgan Hill, Calif. Esta bicicleta ha alcanzado un gran éxito en el mercado, ya que pesa la mitad que una similar con el cuadro de acero. (13)

2.4.5 Aplicaciones de Alta Temperatura.

Como ya se ha comentado, los materiales compuestos de matriz de aluminio mantienen sus propiedades hasta temperaturas más elevadas que las que resisten las aleaciones de matriz sin reforzar, lo que las hace útiles para aplicaciones a temperaturas relativamente elevadas. Por ejemplo, Allied-Signal (USA) está fabricando por pulvometalurgia, dentro del programa Mr Force Title II, una aleación 8009/SiC/11p con este propósito. (13)

2.4.6 Militar.

En el campo militar, la marina de los Estados Unidos ha desarrollado aleaciones de aluminio/SiC de las series 2000, 6000 y 7000, para su aplicación en la fabricación de barcos (armazones y cubiertas), aplicaciones submarinas y estructurales (torpedos y minas).

2.4.7 Industria Automotriz

La industria automotriz en la actualidad enfrenta retos técnicos, tales como mejora en la economía del combustible, reducción de emisiones del vehículo, aumento en las opciones de estilo y mejora en el rendimiento, así que para ello se requiere de tecnología avanzada para enfrentar estos retos. Por lo tanto, existen oportunidades muy importantes para el uso de materiales avanzados. El aumento del uso de los metales ligeros tiene gran consideración para su uso en aplicaciones de gran volumen de producción. Algunos ejemplos incluyen al aluminio en estructuras de autos, componentes de chasis y monoblocks de motores, las aplicaciones de aleaciones de titanio para válvulas de motor y bielas. Los MMC son buenos candidatos para su uso en la industria automotriz debido a sus propiedades superiores y su capacidad de adaptar estas propiedades para aplicaciones particulares.

2.5 Aplicación del Proceso FSW en la Industria Automotriz

En la actualidad, el interés y aplicaciones para el proceso FSW en la industria automotriz se ha enfocado en tres categorías generales. Estas tres categorías incluyen la unión de extrusiones para formar “extrusiones más grandes”, unión de tailored blanks y la unión de varias aplicaciones de ensambles. El proceso FSW en cada una de esas categorías tiene distintos beneficios y reducciones en costos y otras ventajas que permiten beneficios en su aplicación. (19)

Para cada una de esas categorías, el diseño de la junta es una consideración importante. Para la unión de extrusión y las aplicaciones generales de ensamble, existen dos configuraciones de uniones básicas que serán empleadas probablemente. Esos dos diseños de juntas son de soldadura a tope y soldadura de traslape con penetración parcial, por lo que son los más capaces de manejar las variaciones del proceso a producción de gran volumen.

En todas estas aplicaciones, las velocidades de avance del proceso FSW deberían haber sido demasiado lentas para justificar económicamente el uso de este proceso de soldadura. Sin embargo, a través de los esfuerzos de desarrollo del proceso, la velocidad de avance ha mejorado.

2.5.1.1 Unión de Extrusiones

La unión de extrusiones con el uso del proceso FSW se considera como una tecnología que permite generar perfiles de extrusiones más largos, que no podrían ser fabricadas previamente.

Para la industria automotriz, generalmente se acepta que las extrusiones más grandes estén dentro del rango de diámetro de 200 mm a 300 mm. Las extrusiones largas pueden ser fabricadas, pero su costo por masa del material aumenta con el incremento del tamaño de la extrusión.

Con el proceso FSW, dos extrusiones más pequeñas pueden ser unidas con varias configuraciones de juntas de soldaduras para generar extrusiones más largas. Un ejemplo de ello, es un componente que se muestra en la Figura 2.15.



Figura 2.1414152-15 Brazo automotriz fabricado de extrusiones soldadas por FSW. (19)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

2.5.1.2 Estampados (Tailored Blanks)

Tailored Blanks

Otra área de aplicación potencial importante para la soldadura por FSW es la soldadura de tailored blanksestampados. Los tailored blanksestampados soldados consisten en varias secciones de hojas planas, las cuales son topadas y después unidas.

Estas hojas planas son sometidas a una operación para dar forma a hojas unidas dentro de su geometría final. El propósito de los tailored blanksestampados soldados es optimizar el uso del material, y no solo para esto, sino también para reducir el peso del componente final formado. En la Figura 2.16 se visualiza un refuerzo interior soldado.



Figura 2.16 Tailored blanksEstampados. (19)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

2.5.1.3 Soldadura a Tope para Espesores Disímiles

En la industria automotriz, la probable aplicación para soldadura a tope de espesores disímiles es el tailored blankestampado soldado. Este enfoque en particular, deja una tensión elevada en el lado inferior de la soldadura. La

sensibilidad a la posición de la costura podría sugerir que la capacidad de seguimiento de la costura será requerida para esta aplicación, a menos que exista un estricto control de espesor de material o hasta que los diseños de la herramienta desarrollados permitan que el proceso sea menos sensible a esta variación. En la Figura 2.17 se muestra una sección transversal de una soldadura típica en espesores disimiles.

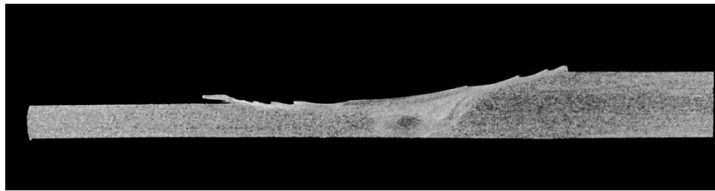


Figura 2.16-2.17 Soldadura a tope de espesores disimiles. 1 mm a 2 mm de la aleación 6111 – T4. (19)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

A medida que el uso del aluminio en la industria automotriz se ha incrementado considerablemente, el proceso FSW ofrece muchos beneficios potenciales para la unión del aluminio y sus aleaciones. En contraste con la mayoría de procesos de unión, siendo más capaz de manejar las variaciones inherentes en gran producción de volumen. Este proceso también proporciona propiedades mecánicas mejoradas, en comparación con otros procesos de unión.

En 1981, TWI comenzó a estudiar en los tailored blanks de aluminio para los paneles de las puertas (Figura 2.18) y demostró nuevos conceptos para el proceso FSW en los ejes de transmisión y estructuras espaciales en un proyecto patrocinado de un grupo especial involucrando a BMW, Daimler Chrysler, EWI, Ford, General Motors, Rover, Tower Automotive y Volvo. (20)



Figura 2.1747482-48 Tailored blank soldado por FSW producido de la serie de aluminio 6000 en 1998. TWI, BMW, Land Rover. (20)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Como una consecuencia de los resultados del proyecto mencionado anteriormente, el proceso FSW y su variante, Soldadura por Fricción-Agitación por Puntos (FSSW, siglas en inglés) están siendo utilizados en la serie de producción de componentes automotrices de aluminio en varios lugares del mundo.

Ford en Detroit (USA) utiliza el proceso FSW en la consola central para el carro deportivo Ford GT (Figura 2.19). La consola central es una parte estructural que aumenta la rigidez del chasis y se utiliza también como un tanque de combustible (Figura 2.20). El lugar del tanque proporciona buena distribución de peso y resistencia a los golpes. Los componentes mecánicos, incluyendo las bombas, los sensores de nivel y las válvulas de control de vapor son primero montados en un riel de acero, después un tanque de una sola pieza es moldeado por soplado alrededor del carril. Este concepto de diseño maximiza el volumen del combustible y reduce el número de conexiones al sistema de combustible.



Figura 2.18-19-2-19 Consola de aluminio soldada por FSW para el depósito de combustible del Ford GT. (20)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita



Figura 2.19-19-2-20 Soldadura por FSW aplicada en la consola central del Ford GT. (20)

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Código de campo cambiado

Tower Automotive en Grand Rapids (Michigan, USA) produce suspensiones traseras de aluminio para los carros Lincoln Town designadas como limosinas. Estos carros tienen instalados dos ejes de gran potencia, mientras que el resto de la suspensión trasera se mantiene sin cambios. La suspensión trasera está hecha de dos extrusiones idénticas, soldadas por FSW simultáneamente con dos ejes en ambos lados (Figura 2.21).



Figura 2.202021-2.24 Suspensión trasera soldada por FSW para las limosinas Lincoln. (20)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Sapa en Finspång (Suecia) utiliza una máquina de FSW con dos cabezales de soldadura para unir perfiles huecos de aluminio en ambos lados a la vez, para producir los asientos traseros plegables del V70 Station Wagon Volvo (Figura 2.22).



Figura 2.212422-22 Producción de FSW en asientos traseros del carro Volvo. (20)

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Código de campo cambiado

Mazda en Hiroshima (Japón) utiliza el proceso [de soldadura de puntos por fricción-agitación \(FSSW, por sus siglas en inglés\)](#) para las puertas traseras y capós del Mazda RX-8 (Figura 2.23). El capó de este carro deportivo tiene una estructura de absorción de impactos con el fin de aumentar la protección de los peatones. Utilizan el proceso FSSW para evitar salpicaduras y para reducir el consumo de energía significativamente en comparación con la soldadura de puntos por resistencia.



Figura 2.2222232-23. FSSW para las puertas traseras del Mazda RX-8. (20)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Riftec en Geesthacht (Alemania) proporciona asesoramiento en producción e ingeniería, durante la instalación de robots de FSW en las líneas de manufactura de la industria automotriz. En la Figura 2.24 se muestra un ejemplo de esta aplicación.

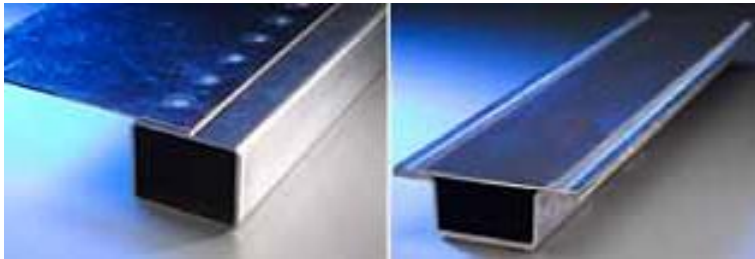


Figura 2.2323242-24. Robots de FSW aplicados en partes automotrices. (20)

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Código de campo cambiado

Sapa produjo un sistema de cuna soldado por FSW. La cuna es el resultado de un estudio de peso ligero para reducir el peso en el extremo delantero del vehículo. El peso de esta subestructura es de 16 kg, comparado con 23 kg de la versión de acero.

Los ensamblajes usan varios productos semi fabricados y métodos de unión. El travesaño delantero es un elemento extruido recto. El travesaño trasero se construye de una pieza de fundición de arena y una placa unida a la pieza de fundición por FSW. Esta operación de soldadura fue ejecutada en tres

dimensiones. Un análisis de costo demostró que el concepto es competitivo con otros conceptos dentro del marco propuesto por el cliente. En la Figura 2.25 se muestra un prototipo de un sistema de cuna producido por FSW.



Figura 2.25 Prototipo de un sistema de cuna por FSW. (20)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

2.6 Técnicas de Caracterización

Los MMC han sido ampliamente estudiados mediante la evaluación de propiedades mecánicas, ~~sin embargo, solamente con este análisis el entendimiento de los fenómenos químicos y moleculares permanecen en la deriva~~. Debido a que los MMC son heterogéneos e híbridos, su proceso de caracterización puede ser difícil si se emplea una sola metodología.

En la actualidad existe una gran cantidad de técnicas de caracterización para el estudio de los MMC, dentro de este capítulo solamente se mencionan aquellas que se consideren principales, las que constituyen, tanto para compuestos como para aleaciones sin refuerzo, los análisis básicos y de más fácil acceso para análisis microestructural.

2.6.1 Técnicas de Caracterización

2.6.1.1 Microscopía Óptica

Todos los exámenes microestructurales se inician con el uso de magnificaciones bajas, seguido de magnificaciones progresivamente mayores para valorar las características básicas de la microestructura eficientemente, de esta manera se puede estipular que el microscopio óptico continúa siendo la herramienta más importante para el estudio de la microestructura de los materiales, teniendo en consideración la evaluación ~~con~~ instrumentos electrónicos metalográficos sofisticados, tal como la microscopía electrónica de transmisión (TEM, [por sus siglas en inglés](#)) y la microscopía electrónica de barrido (SEM, [por sus siglas en inglés](#)), que las convierte en herramientas invaluable para el análisis microestructural y, — sin embargo, deben emplearse complementariamente y no ~~de en~~ sustitución ~~al del~~ análisis por microscopio óptico. (21)

La microscopía óptica constituye la primera y más básica de las etapas desarrolladas en el proceso referente a la caracterización microestructural. Esta fase se basa principalmente en la observación del espécimen a estudiar por medio de un microscopio electrónico compuesto por un sistema de iluminación, condensadores, filtros de luz, lente objetivo y ocular como componentes extras que optimizan la calidad de la imagen obtenida. (21)

La muestra que se utiliza para la caracterización microestructural, debe someterse a un proceso de preparación especialmente diseñado, mismo que será explicada posteriormente. Uno de los pasos más importantes dentro de este método, es el uso de reactivos para efectuar el ataque de la muestra; estos [s](#) reactivos son soluciones químicas cuidadosamente diseñadas y balanceadas para que los componentes de dicha solución, revelen con detalle cada una de las

características metalográficas del espécimen que se analiza, tales como, granos, fases presentes y dimensiones localizadas dentro del rango permitido por el microscopio en sí. Después de que le muestra se encuentre preparada, será observada a diferentes aumentos, dentro de los que se contempla desde 5X hasta 1500X, en microscopios más comunes. (21)

Aquellos materiales que pueden ser analizados por medio de esta técnica abarcan un amplio rango, desde metales, cerámicos, compuestos hasta materiales geológicos, en tamaños dentro de un rango de 10^{-5} hasta 10^{-1} m. (21). Algunas de las desventajas que se presentan en este proceso, es el límite de resolución que es de aproximadamente $1 \mu\text{m}$; tiene una profundidad de campo limitada, siendo que, le es imposible enfocar en superficies ásperas; además, no proporciona información directa de la composición química o cristalografía de las características microestructurales. Sin embargo, este proceso se caracteriza por ser relativamente sencillo y de completa accesibilidad, en comparación con algunas otras técnicas, sin mencionar que, dependiendo de la muestra, puede ser un procedimiento sencillo, con un tiempo mínimo de análisis estimado en 30 minutos. (21).

2.6.1.2 Microscopia Electrónica de Barrido

El microscopio electrónico de barrido (SEM, siglas en inglés) es una de las herramientas más versátiles para la investigación de la microestructura de materiales metálicos. (21). Comparado con la microscopía electrónica óptica, el SEM expande los rangos de resolución en más de un orden una magnitud hasta aproximadamente $10 \mu\text{m}$ en instrumentos de rutina, con valores últimos por debajo de los 3 nm , de este modo, las magnificaciones se extienden desde los 10, 000X hasta por encima de los 150, 000X. La profundidad del foco se da en un rango de 1mm a 10, 000X hasta 2mm (.08 in) a 10X, es dos veces mayor debido a que la apertura del rayo-haz es muy pequeña. (21).

El sistema básico de funcionamiento, consiste en un haz de electrones que es emitido desde un cátodo de tungsteno calentado y enfocado por un sistema de lentes magnéticos (usualmente dos lentes condensadores y un lente objetivo) a un diámetro menor (aproximadamente 10 nm o 100 Å en instrumentos estándar y de 1 nm o 10 Å en alta resolución), voltajes de aceleración de 1000 a 50,000 V y la corriente de electrones primarios que pasa a través de la superficie es de aproximadamente 10^{-8} a 10^{-7} A. Esta corriente se puede incrementar empleando fuentes de electrones más efectivas, tales como cátodos de hexaboruro de lantano, los cuales se encuentran disponibles en la mayoría del instrumental comercial, o bien cátodos de emisión de campo que aún no se encuentran ampliamente utilizados. Para generar el vacío requerido, se emplea una bomba de difusión o una bomba turbomolecular. (22)

El haz de electrones escanea la muestra casi como lo hace un tubo de rayos catódicos (CRT) empleado para la ~~in~~formación de la imagen en una pantalla de televisión. Un generador de escáner que controla la corriente de las bobinas de barrido desvía el haz a lo largo de las líneas ~~erradamente~~ cercanamente espaciadas. La magnificación se cambia ajustando la corriente de las bobinas de flexión; el rango normal es de 10 a 150, 000X. Los electrones excitados por el haz de electrones y emitidos desde la superficie de la muestra son recolectados en un detector de electrones. La corriente de electrones que colisiona con el detector es aún menor que el haz primario (aproximadamente 10^{-2} A) y debe ser amplificado por la multiplicación directa de electrones y amplificadores convencionales de electrones. La señal de amplitud controla el brillo del haz en el CRT, ~~el-la~~ esta ~~sincronizado~~ sincronizada al haz de electrones de la columna del microscopio. (21)

El SEM se emplea para caracterizar superficies de fractura, circuitos integrados, productos de corrosión, materiales en polvo, estudios de

deformación, orientación de cristales y otras superficies rugosas, especialmente cuando el microanálisis elemental de características pequeñas es deseado. (21)

2.6.1.3 Microscopía Electrónica de Transmisión

La microscopía electrónica de transmisión (TEM, siglas en inglés), fue comercializado en los años 50's, y muy rápidamente se demostró que el uso de esta técnica podía ser empleada en investigación fundamental de materiales y metalurgia aplicada. Esta técnica es particularmente aplicable para la detección de heterogeneidades en cristales, tales como defectos lineales y precipitados empleando una interacción inelástica de los electrones con los átomos de la muestra.

La [microscopía electrónica de transmisión \(TEM\)](#) se lleva a cabo con el uso de un microscopio, el cual puede ser operado en diferentes modos. En el modo estándar de TEM, la unidad es operada para formar imágenes de campo claro, imágenes de campo oscuro e imágenes de red.

La imagen de campo claro, se forma cuando únicamente se emplea un haz directo para formar dicha imagen, mientras que para campo oscuro se empleará un haz levemente excitado de campo oscuro; en cuanto la imagen de red, se emplea la interferencia de al menos dos haces de luz en el plano de imagen de la lente objetivo. (21)

El patrón de difracción formado por los métodos previamente mencionados, provee información cristalográfica relacionada con la identificación cualitativa de fases y las relaciones de orientación entre los cristales y la dirección del haz de electrones que incide.

Las líneas de Kikuchi pueden ser empleadas para determinar la orientación; la técnica de haz divergente provee información acerca de la simetría de los cristales y determinación de espesores. (21)

2.6.1.4 Difracción de Rayos X

Más del 94% de los materiales sólidos pueden ser descritos como materiales cristalinos. Cuando los rayos x interactúan con una fase cristalina, el resultado será un patrón de difracción que será como una huella digital propia y original. La difracción de rayos X (XRD, siglas en inglés) está basada en las interferencias ópticas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija-apertura de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación. Debido a la naturaleza no destructiva de esta técnica, el análisis de una amplia gama de materiales, incluso fluidos, metales, minerales, polímeros, catalizadores, plásticos, productos farmacéuticos, recubrimientos de capa fina, cerámicas y semiconductores. La aplicación fundamental de la Difracción de Rayos X, es la identificación cualitativa de la composición mineralógica de una muestra cristalina. Otras aplicaciones, son el análisis cuantitativo de compuestos cristalinos, la determinación de tamaños de cristales, la determinación del coeficiente de dilatación térmica, así como cálculos sobre simetría del cristal y en especial la asignación de distancias de determinadas familias de planos y la obtención de los parámetros de la red. (23)

El resultado que se obtiene por esta técnica se le conoce como patrón de difracción de rayos x o difractograma, el cual recoge los datos de intensidad en función del ángulo de difracción 2θ obteniéndose, una serie de picos, de los cuales, se evaluarán principalmente la posición e intensidad que presenten. (23)

Algunas desventajas que puede llegar a presentar esta técnica, es que no es adecuada para elementos cuyo número atómico sea menor de 11, a menos que

se cuente con un equipo especial, así mismo, para muestras de película delgada, la detección se limita hasta aproximadamente 100 ng/cm^2 y finalmente los límites de detección para determinaciones en masa son del orden de ppm (partes por millón), dependiendo de la energía empleada y la composición de la matriz de la muestra. (23)

2.6.1.5 Difracción de Electrones Retrodispersados

Los electrones son el medio adecuado para el estudio microestructural y cristalográfico, en el cuál se basa la técnica de— Difracción de Electrones Retrodispersados (EBSD, siglas en inglés). Hasta la época de 1980, la EBSD era la técnica más ampliamente utilizada para los análisis mencionados con anterioridad, con ayuda de las técnicas SEM y RXD de Laue; fue entonces que se desarrolló una técnica basada en SEM, especialmente para el estudio de la microtextura a la cual se le conoció como EBSD. (24)

La técnica EBSD se basa en la colocación de la muestra dentro de la cámara para SEM de manera que un ángulo pequeño, comúnmente 20° , se forma entre el haz de electrones incidente y la superficie de la muestra, con la que la proporción de electrones dispersados disponibles a ser sometidos a difracción se mejora. El patrón resultante puede ser capturado e interpretado de manera inmediata, mientras que algoritmos computacionales sofisticados permiten la orientación de cada uno de los patrones de difracción. (24)

Básicamente se cuentan con dos modos de operación en EBSD, que son, el manual y automático. En el funcionamiento manual se ve involucrada la participación de un operador, el cual estará en contacto con el sistema durante la recolección de datos y la selección de la localización individual de la muestra de la cual se obtendrán las medidas de orientación. Este modo manual, es adecuado únicamente para investigaciones especializadas, por ejemplo,

aquellas que involucren estructuras cristalinas complejas. Por lo contrario, en el modo automático, es posible que la localización de la muestra sea programada y colocada por un láser o una etapa de control en el microscopio mismo. (24)

2.6.2 Preparación de Muestras

2.6.2.1 Metalografía Óptica

La mayoría de las precauciones tomadas para la preparación de muestras de MMC se relaciona con dos problemas principales:

- a. El desgaste del refuerzo que se remueven de la matriz durante el corte, desbaste o pulido.
- b. Las dificultades en relación a la diferencia de propiedades entre el refuerzo y la matriz, lo que puede ocasionar una diferencia topográfica entre el refuerzo y la matriz. (22)

Los MMC, en especial aquellos que contienen fibras de grafito de carbono, son susceptibles a la corrosión galvánica durante su preparación. Esto puede ser controlado empleando agua destilada en lugar de agua dura, evitar discos de desbaste y pulido que sean catódicos a la matriz del compuesto y minimizando los tiempos de preparación.

- a. *Corte.* La práctica preferida es seccionar la muestra empleando una sierra a baja velocidad con una hoja de diamante. En la mayoría de los casos, un refrigerante apropiado debe ser empleado durante el proceso. Si durante la operación se detecta que el refuerzo se desprende, la superficie de la muestra puede ser cubierta con una capa de resina antes de continuar con la operación de corte. (22)

- b. *Montaje*. Las muestras de mayor tamaño deben ser montadas o al menos recubiertas con alguna resina antes de la preparación metalográfica para evitar daños al compuesto. Debido a que el material normalmente tiende a ser ligero, es necesario sujetarlo de manera que no sea posible para la muestra flotar en el medio de montaje, esto puede lograrse con alguna clase de sujetador o clip.

También se tiene que considerar la temperatura que se presenta en la operación del montaje, muchas veces la temperatura elevada requerida para curar la baquelita o cualquier otro material de montaje similar, puede llegar a ser demasiado elevada para dañar o alterar el compuesto, por lo que, el montaje en frío es una de las prácticas comúnmente utilizadas. Para materiales MMC, una resina de polvo reforzada con una resina acrílica y fibra de vidrio, es una de las opciones de un uso más amplio, debido a que esta resina es muy dura y resistente a la abrasión. (22)

- c. *Limpieza*. Muchos materiales compuestos requieren únicamente una limpieza estándar entre el pulido y/o el desbaste. Para la mayoría de los compuestos de matriz de resina, es mejor no usar nada más agresivo que un jabón neutro y agua. Limpieza ultrasónica empleando agua que contenga jabón libre de fosfato es una práctica generalmente exitosa. (22)
- d. *Desbaste*. Dentro de esta operación es necesario emplear agua destilada para los MMC y debe evitarse el desbaste en seco, en contraste, un refrigerante también debe ser empleado, y podrá ser diferente agua, siempre y cuando, sea seguro que no ~~deñe~~ dañe la matriz. El desbaste en disco o con papel de carburo de silicio produce buenos resultados, y así mismo, lo es el desbaste en papel de carburo de silicio a mano, empleando un movimiento en forma de “8” y cambios continuos de papel. En el caso de que el refuerzo y la matriz no presenten una gran diferencia

en propiedades, se puede seguir una secuencia común de desbaste iniciando con la remoción de 1-2 mm de material con una lija 240 a velocidades moderadas a altas y agua suficiente. Los pasos subsecuentes se llevarán a cabo a través de lijas 400 a 600; así como también, una secuencia de desbaste que incluya las lijas de carburo de silicio o alúmina 80, 120, 180, 240, 320, 400 y 600. Para los materiales MMC el desbaste empleando un disco de diamante y pulido, aplicando agua moderadamente, produce resultados satisfactorios. Los discos de diamante son los de malla 100 μm , 45 μm y 30 μm , seguidos por los de 15 μm , 9 μm y 6 μm . (22)

- e. *Pulido*. En esta operación se producen buenos resultados utilizando diamante, alúmina y otros compuestos de pulido tales como el óxido de cerio o el óxido de magnesio. El compuesto natural de diamante contiene partículas en forma de agujas, los cuales resultan ser más eficientes en el pulido, sin embargo, pueden quedar atrapados en una matriz suave, provocando un daño excesivo, en contraste con los compuestos sintéticos de diamante, que contienen partículas de forma esférica. Aunque la alúmina suele ser altamente efectiva en la remoción de rasguños, esta tiende a producir protuberancias. Por ende, el pulido con diamante con un paso final de manera rápida con alúmina o alguna otra combinación de paso de pulido suele ser empleada.

En cuanto a la lubricación, es preferible el agua destilada para el pulido, particularmente con compuestos de matriz de resina, aunque los lubricantes de pulido con base de aceite también son altamente recomendados. Para los materiales de MMC comúnmente se emplea keroseno.

Teniendo en consideración los aspectos mencionados anteriormente, se describe una práctica común para el pulido en los MMC. El pulido debe

realizarse entre 10 y 45 minutos para cada uno de los tamaños de solución hasta las 6 μm , empleando una presión baja. Se aplica una pequeña cantidad de agua que cumpla con la función de lubricar. El pulido de disco debe ser seguido por un pulido en diamante de 3 μm en un paño de keroseno o seda, utilizando un disco giratorio aproximadamente a 150 rpm.

Se prosigue con la operación aplicando pasta de diamante de .25 μm y un lubricante de keroseno sobre un disco cubierto con papel bond. Una presión ligera pero firme y velocidades bajas son empleadas por alrededor de 10 a 15 minutos. El pulido final se lleva a cabo en una pulidora vibratoria cubierta con un paño de rayo sintético y alúmina de .3 μm en agua destilada por aproximadamente 3 horas. (22)

2.6.2.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Una buena imagen requiere de una superficie libre de contaminación, resistencia de la muestra al alto vacío y al haz de electrones, ausencia de carga eléctrica y suficiente cedencia al paso de electrones.

- a. *Montaje.* Muestras por debajo de 20 mm de altura, espesor o longitud son generalmente removidas de piezas mayores. A fin de prevenir que la muestra se cargue, se utilizan adhesivos conductores como plata, pegamentos que contengan aluminio o adhesivos de carbón que permitan asegurar la muestra.
- b. *Tratamiento Superficial.* Se debe tener mucho cuidado en la limpieza de la pieza, debido a que los líquidos de pulido residuales o reactivos atrapados en los poros o grietas contaminan la superficie cuando se coloca la muestra en la cámara de vacío. Sí se llegan a presentar rayones, diferencias de altura,

fases suaves y duras, capas deformadas que no han podido ser removidas en el pulido mecánico, pueden usualmente ser removidos por el pulido electrolítico. Las superficies de fractura, si no son recientes, deben ser limpiadas asegurando que se erradicó la presencia de cualquier aceite o grasa que pudiera estar presente. Los productos de reacción se forman durante la exposición prolongada a la atmósfera o por reacción a alta temperatura pueden ser removidos electrolíticamente, por reducción de hidrógeno o químicamente. La limpieza de la superficie de fractura.

- c. *Recubrimiento conductivo.* Una capa de recubrimiento lo suficientemente gruesa debe ser aplicada para crear un camino conductivo, sin embargo, debe ser lo más delgadas posible para evitar obscurecer los detalles finos. El espesor mínimo depende de la rugosidad de la superficie y va desde .5 nm a 10 nm y hasta 100 nm para superficiales demasiado ásperas.

Se aplica carbono, oro, platino, paladio, plata, cobre o aluminio por evaporación al alto vacío o pulverización catódica. Este último método es preferido debido a que las capas pulverizadas muestran una mejor adhesión y más condensación difusa. Por ende, los poros y socavados son accesibles; para la evaporación, el acceso es posible únicamente empleando carbono. La selección del material de recubrimiento es cuestión de elección personal.

En base a consideraciones físicas, un recubrimiento de oro de aproximadamente 100 nm, tenderá a producir una máxima emisión de electrones secundarios (SE).

- d. *Realce de Contraste por Recubrimiento.* Esta operación se aplica ocasionalmente para mejorar la impresión plástica empleando el efecto de sombras. Empleando un recubrimiento con alto SE, como el oro, se puede obtener una imagen positiva brillante, resaltando los detalles obscureciendo sombras en dirección de la evaporación oblicua. Los recubrimientos también

pueden mejorar el contraste de los materiales formando una capa en una de las fases únicamente.

- e. *Ataque Químico*. Esta operación no es necesaria cuando el contraste del material empleado para la formación de imagen; las diferencias entre los números atómicos aparecen como variaciones de brillo, la fase que contiene los elementos menores aparecen más oscura. El ataque, que sería dañino en estos casos, oscurece los efectos del contraste topográfico para la formación de la imagen, entonces el ataque ya sea químico, electrolítico o por iones es aplicable. El ataque puede producir efectos especiales, tales como revelación de dislocaciones; mientras que un ataque profundo comúnmente se emplea para el estudio de constituyentes microestructurales de forma compleja. (21)

2.6.2.3 Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM)

Las muestras aptas para el análisis por TEM deben presentar un espesor de cientos de nanómetros, dependiendo del alto voltaje de operación que el instrumento posea.– Una muestra ideal es delgada, representativa, estable, limpia, plana con lados paralelos, de fácil manejo, conductiva y libre de segregaciones en la superficie. (22)

Para iniciar, es necesario cortar una muestra pequeña del total del material a analizar, tomando en cuenta que se analizará de forma perpendicular a la muestra. En esta etapa, la muestra probablemente tendrá dos superficies rugosas, y su espesor debe ser determinado por la profundidad estimada de daño causado por la técnica de corte seleccionada.

- a. *Preparación de superficies planas.* Una vez que se ha cortado una muestra de 3 a 0.5mm de espesor, las caras deben ser preparadas de la manera más plana y paralela posible. Las caras paralelas se consiguen de una manera más fácil por medio de una máquina de fresado y pulido; este último método es preferible debido a que la profundidad de daño puede ser mínima si se emplea un abrasivo fino. Se pueden producir hojas con lado paralelos de 100 μm o menos de a partir de la mayor parte de los materiales si se pulen con un polvo abrasivo de malla 600. (22)
- b. *Adelgazamiento químico.* Este método se utiliza para adelgazar la muestra con menores efectos de daño. Si el material de la muestra es abundante, la muestra puede sumergirse en la solución sin temor al ataque preferencial en los bordes. Sin embargo, hay que tener en consideración que un ataque químico exitoso requiere la solución adecuada.
- c. *Fabricación de la oblea.* La mayoría de las técnicas automáticas de adelgazamiento final requieren una muestra en forma de oblea de 3 mm. La oblea es fácilmente manejada y colocada en la mayoría de los microscopios sin necesidad de una rejilla, y provee buen soporte estructural para las áreas más delgadas de la muestra. El material puede ser preparado inicialmente como una barra de 3 mm de diámetro, del cual se pueden cortar obleas utilizando un disco de corte de diámetro o una máquina de corte en miniatura. Las obleas serán comúnmente de 1 mm de espesor aproximadamente y pueden ser adelgazadas más adelante empleando diversas técnicas. (22)

Sin embargo, en el centro de la oblea son incluidos hoyuelos con el objetivo de mantener el espesor de 1 mm en el cerco exterior, facilitando su manejo [con](#) pinzas, y así mismo se aseguran menos de 100 μm en el centro. Esta perforación, que requiere menos tiempos que el

adelgazamiento final, puede ser llevada a cabo de manera mecánica por el electropulido o bomba de iones.

- a. *Adelgazamiento final.* Se emplea para llevar una muestra delgada hasta su espesor final. En el electropulido, una celda electrolítica es establecida; la muestra es el ánodo, y se aplica un potencial adecuado para disolver la muestra de una manera controlada. El proceso comúnmente continúa hasta que un orificio se forma en la muestra. [En la figura 2.26 se muestran las etapas del electropulido.](#) (22)

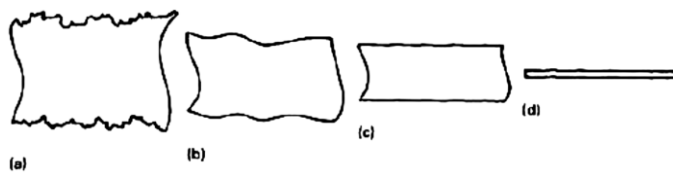


Figura 2.2525262.26 Etapas del electropulido. (a) La muestra rugosa debe ser (b) pulida, (c) suavizada, y (d) adelgazada uniformemente. (22)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Para producir las acciones electrolíticas de pulido, suavizado y adelgazamiento, el electrolito debe contener generalmente un agente oxidante y reactivos que formarán una capa viscosa delgada estable. El pulido final se obtiene por la disolución que es controlada por la longitud del patrón de difusión a través de la película viscosa del electrolito. [En la figura 2.27 se aprecia la acción fina del electropulido.](#)

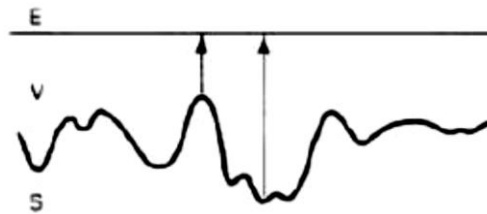


Figura 2.26-27 Acción fina de electropulido. Una película viscosa (V) se forma entre la muestra (S) y el electrolito (E); los puntos más elevados tienen un camino de difusión menor a través de la capa y pulen más rápidamente. (22)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Debido a que la película viscosa debe ser mantenida en un espesor delgado, el electrolito debe contener un solvente para los óxidos contenidos en la capa viscosa, así como también una agente oxidante y un formador de una película. Un reactivo actuará de las tres maneras, y el electrolito puede ser simple. Un ejemplo es la solución diluida ~~en~~ de ácido perclórico (HClO_4) en etanol, el cual es virtualmente el agente de electropulido universal. (21)

Una vez que se ha determinado la composición del electrolito, la variable esencial es el potencial aplicado. Un potencial muy bajo generalmente conllevará a un ataque, mientras el potencial muy bajo resultara en picaduras y un pulido heterogéneo. Ambas condiciones deben ser evitadas, siendo las condiciones adecuadas en principio determinadas por una curva experimental de corriente – voltaje.

- b. *Técnica de la ventana.* El método más accesible de una celda de electropulido consta de una cubeta de precipitación de electrolito dentro de la cual, el cátodo y la muestra son sumergidos. El cátodo consiste en una lámina del mismo material que la muestra o un material inerte como platino o acero inoxidable. La muestra actúa como ánodo y un cuadro de lámina de 10 a 20 mm es generalmente sostenido en pinzas de metal, de manera que el potencial pueda ser aplicado usando pinzas caimán. Los

bordes de la muestra y las pinzas deben ser cubiertos con una laca resistente al ácido para protegerla contra el ataque. Una “ventana” de metal queda expuesta, razón a la cual se debe el nombre de esta técnica, las pinzas están sujetas a mano de manera que la muestra se sumerge y se aplica el potencial. [En la figura 2.28 se visualiza un diagrama de la técnica de la ventana.](#) (21)

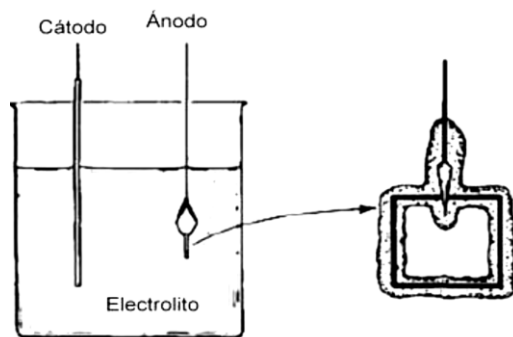


Figura 2.27-28 Técnica de la ventana. La lámina se sujeta con pinzas y se recubre con laca; después de ello forma el ánodo en la celda electroquímica. (21)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

- c. *Pulidor de chorro automático.* La mayoría de los electropulidores operan en el principio de que un chorro del electrolito es dirigido al centro de la muestra de 3 mm en forma de oblea, esto para acelerar el ataque, asegurando la perforación del centro antes que los bordes se adelgacen considerablemente. Esto produce una muestra ideal para el montaje en el microscopio; los bordes de la muestra pueden ser manejados fácilmente y soportar las áreas delgadas en el centro. (22)
- d. *Adelgazamiento por láser de iones.* Se emplea comúnmente sobre placas de metal que se llevarán a su espesor final. En este proceso, un haz de iones de gas inerte o átomos es dirigido a la muestra, y los átomos o moléculas son expulsados de la muestra en el punto de colisión de iones.

2.6.2.3.62.6.2.3.3 Difracción de Rayos X (RXD)

Uno de los aspectos más atractivos respecto a esta técnica, es el hecho de que la preparación de muestras es relativamente sencilla comparada con las técnicas descritas anteriormente.

El proceso de difracción de rayos x puede llevarse a cabo en muestras en forma de material sólido, mínimo de 1 cm x- 1 cm, o bien en materiales en forma de polvo. En cuanto a las dimensiones, el único requisito es que el tamaño o cantidad no excedan el permitido para ser sostenido por el porta muestras, mientras que para el caso de los sólidos, dicha cláusula aplica de la misma manera aunado a la condición de que al menos una de las caras debe ser completamente plana.

2.6.2.3.72.6.2.3.4 Difracción de Electrones Retrodispersados (EBSD)

Debido a que EBSD es una técnica de superficie donde saldrá un patrón de difracción, la preparación de la muestra es un poco crítica. La secuencia de preparación constará de cuatro etapas de manera general:

- a. *Montaje de muestra.* En este paso se recomienda emplear como material de montaje uno de carácter conductivo que ayude a disipar las cargas. El montaje permitirá que los pasos siguientes se lleven a cabo de una manera más fácil. Sin embargo, la temperatura es uno de los parámetros a controlar, ya que los procesos de montaje en caliente podrían llegar a dañar e inclusive a fracturar la muestra.
- b. *Desbaste.* Este es el primer paso mecánico de la preparación de muestra. Su objetivo es remover la capa deformada que se produce por el corte y

asegurar una superficie plana. Comúnmente se puede iniciar con lijas de carburo de silicio 120 a 240. Una vez concluido el ciclo en estas lijas se procede a utilizar una lija 1200, asegurando siempre el uso de agua como lubricante para remover los residuos que se generen.

- c. *Pulido*. En esta etapa se pretende remover la mayor parte del daño causado por el desbaste. Normalmente se recomiendan de 4 a 5 con suspensión o pasta de diamante, empleando soluciones de 15 μm descendiendo hasta .25 μm en un paño de uso general. Para el pulido de la muestra se cuenta básicamente con 4 técnicas diferentes: pulido mecánico, electropulido, ataque químico, ataque por iones.
- d. *Sílica coloidal*. La solución de sílica coloidal representa el último paso de la etapa de pulido. Esta solución es generalmente alcalina y ataca ligeramente la muestra durante el pulido mecánico, y se emplea de manera ideal por alrededor de 10 minutos a algunas horas dependiendo del material y del acabado del pulido que se tenga. (24)

2.6.3 Aplicaciones Prácticas Recientes

2.6.3.1 Microscopía Óptica

Somasekharan y Murr emplearon el proceso FSW para llevar a cabo la unión entre materiales disímiles, siendo estos, una aleación de aluminio forjada 6061-T6 y una aleación de magnesio AZ91; la herramienta utilizada en este proceso de soldadura fue de acero O1, teniendo un hombro liso con diámetro de 19 mm y un pin sin roscado; en cuanto a la velocidad de rotación aplicada fue de 800 rpm y una velocidad de soldadura de 1.5 mm/ps.

Después de terminar de soldar las muestras, las secciones transversales fueron cortadas para posteriormente montarlas con el objetivo de analizar sus valores de microestructura y microdureza. Las muestras de soldadura fueron desbastadas utilizando lijas de 220, 320, 500, 800 y 1200. El efecto del agua en el lado del Mg de las soldaduras fue minimizado por una constante limpieza con alcohol etílico. Posteriormente, las muestras fueron pulidas empleando un paño de pulido de uso general y una solución de alúmina de 1 μm en un reactivo de 75% alcohol y 25% glicerol.

Las muestras de Al-Mg fueron atacadas con una solución de 2 g de NaOH en 100 ml de agua destilada y luego enjuagada en una solución de 5 ml HNO_3 en 95 ml de agua destilada. El lado de Mg de la soldadura fue atacado con picral en todas las muestras. El picral es una solución de 14 ml de ácido pícrico, 2 ml de ácido acético glacial y 2 ml de agua destilada.

Las muestras atacadas fueron analizadas con un microscopio de óptico Reichert MEF4 A/M. Toda la sección transversal de la soldadura se analizó a bajas magnificaciones ($<80\times$) para observar toda la extensión de la zona soldada, mostrando los materiales base, las zonas de transición y las zona soldada. Después, la zona de soldadura fue analizada a magnificaciones más grandes para observar las microestructuras intercaladas de la soldadura. En la Figura 2.48-29 se muestran las microestructuras obtenidas, en las cuales se puede observar que la fase eutéctica intermetálica aparece de color blanco.

En la Figura 2.48-29 c se muestra la afluencia de diferentes zonas en la soldadura en relación al lado de avance, la variación del color que se percibe a simple vista en la microestructura muestra la diferencia de energía entre las zonas y un régimen muy fino denotado en color verde delimita los vórtices y espirales en las zonas que se distinguen en la micrografía. Por otro lado, en la Figura 2.29 e y f se aprecian dos zonas diferentes a lo largo de una interfaz

continua. En ambas figuras se visualiza la mezcla (zona 3) de una fase dura (zona 2) en una fase suave (zona 1). (25)

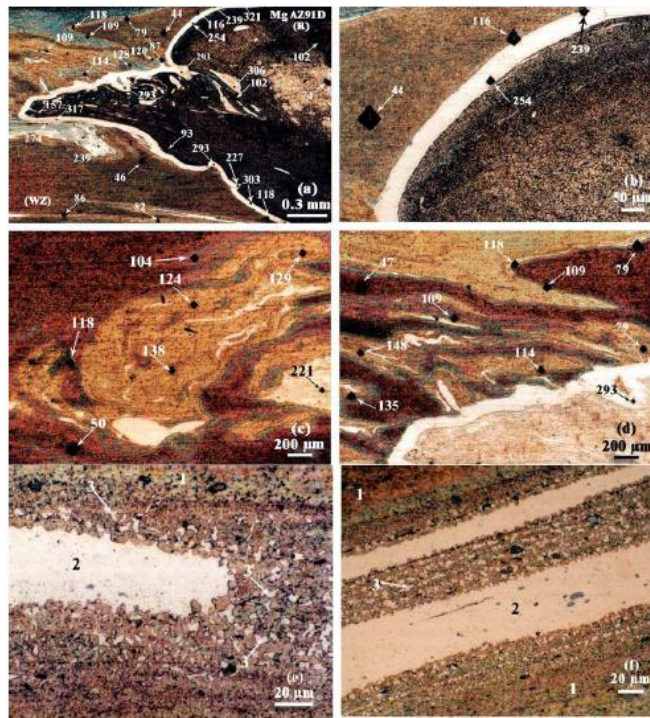


Figura 2.2828292-29 Análisis de una soldadura FSW realizada en una aleación de Al 6061-T6 y Mg AZ91D. a) Zona de soldadura (WZ) y lado de retroceso de soldadura (R); b) régimen ampliado de a); c) régimen ampliado de WZ en el lado de avance; d) régimen que muestra la unión de una fase dura y una fase suave; e) y f) análisis de la unión de Al-Mg: zona de soldadura mostrando la confluencia (zona 3) de los eutécticos e intermetálicos (zona 1) y las áreas más suaves (zona 2) a pesar de la interfaz continua entre ambos. (25)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

La diferencia en la coloración entre las diversas zonas de la soldadura se pueden apreciar las variaciones de energía dentro de las mismas, enmarcando la diferencia entre el tamaño de grano, límites de grano, impurezas y subestructuras de dislocaciones.

2.6.3.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Ghorbani et al (26) utilizó microscopía electrónica de barrido a fin de estudiar la microestructura y superficies de la fractura de MMC Al-15% Mg₂Si con diferentes contenidos de cromo (0.5wt% - 5%wt). Las muestras metalográficas fueron sometidas al proceso de pulido y posteriormente fueron atacadas con 10% de HF y sobre atacadas utilizando una solución de NaOH al 10%.

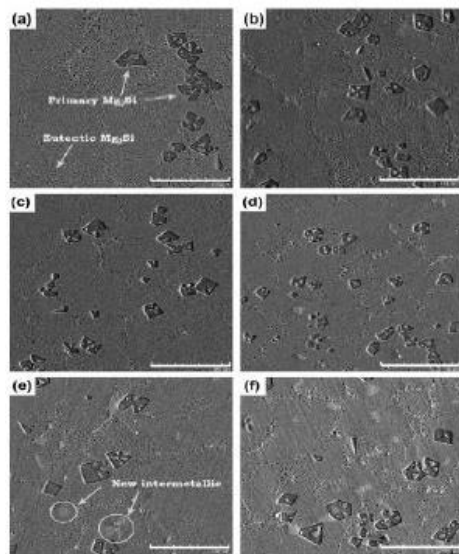


Figura 2.2929302-30 Micrografías por SEM del material de MMC de Al-15%Mg₂Si con diferentes contenidos de Cr: a) 0%, b) 0.5%, c) 1%, d) 2%, e) 3% y f) 5%. (26)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

En la Figura 2.49-30 se muestra la microestructura típica del compuesto Al-Mg₂Si, la cual está compuesta de partículas oscuras de Mg₂Si en una matriz de granos eutéticos de Al-Mg₂Si. El tamaño promedio de partícula de la fase primaria Mg₂Si se encuentra alrededor de 40 μm. Con la adición de Cr por encima de 2% la morfología de las partículas de Mg₂Si pasa de ser dendrítica a poligonal.

En la figura 2.31 se visualiza una superficie de fractura común de un MMC Al- Mg_2Si libre de CU. Los planos de fractura de la mayoría de las partículas de Mg_2Si , muestran un clivaje el cual se deriva de una fractura rápida producida de su fragilidad intrínseca.

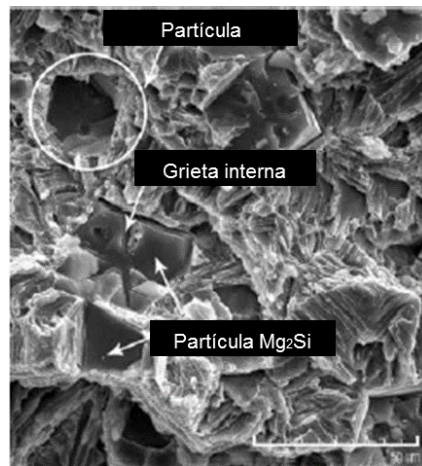


Figura 2.31 Micrografía de fractura típica en una superficie de fractura en un material MMC Al- Mg_2Si sin contenido de Cr. (26)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

En la Figura 2.32 se pueden observar las superficies de fractura cuando se presentan adiciones de Cr, que incluye en la modificación de la estructura del eutéctico de Mg_2Si , de tal forma que pasa de largas hojuelas interconectadas a una estructura en forma de barras, la cual se espera sea más propensa al agrietamiento, a pesar de mejorar la dureza, resistencia y elongación del MMC.

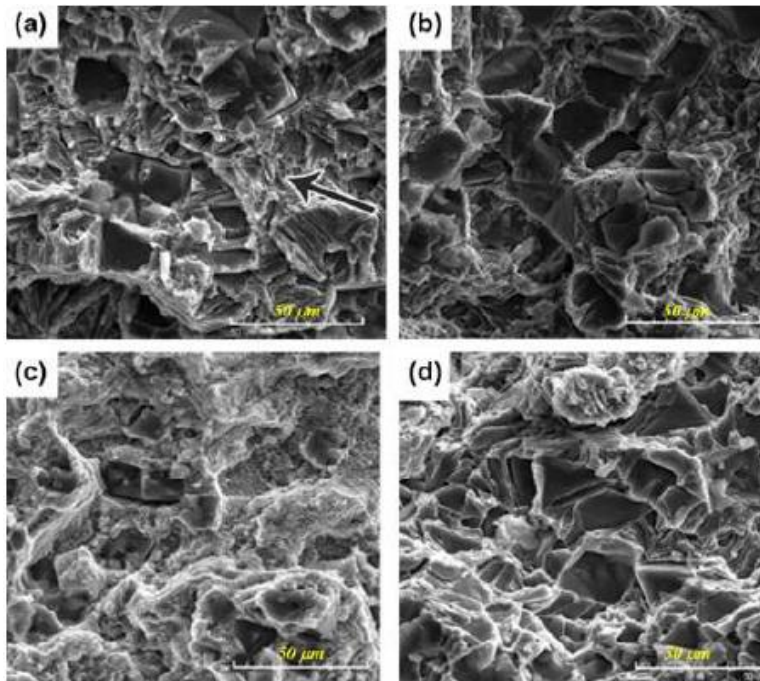


Figura 2.313432-32 Superficies de fractura de Al-15%Mg₂Si con a) 0.5% Cr, b) 1% Cr, c) 3% Cr. (26)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

2.6.3.3 Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) y Difracción de Rayos X (XRD)

Hernandez et al (5), realizaron un trabajo que consistía en la caracterización por medio de TEM en los materiales MMC CMM reforzados con grafito. Este material fue elaborado a través de un proceso de metalurgia de polvos de Al, Cu, Mg y grafito. Se efectuaron observaciones de la microestructura, tanto en estado de molienda, como en condición de extrusión. Para identificar las fases se realizaron pruebas de difracción de rayos x en un difractorímetro Rigaku DMAZ-

Comentado [YA2]: MMC?

2200, operando a 40 kV y 36 mA, con lo cual fueron corroborados los datos que se obtuvieron por TEM.

En la Figura 2.33 a y b se visualizan las imágenes que fueron obtenidas en campo oscuro y campo claro, en las cuales se evidencia el tamaño promedio del cristal de la matriz que se obtiene posterior al proceso de aleado mecánico, que claramente se encuentra dentro del rango nanométrico. En la Figura 2.33 c se muestra que no se produjo alguna reacción entre los polvos durante el aleado mecánico, debido a que las únicas difracciones presentes corresponden al Cu y al Al.

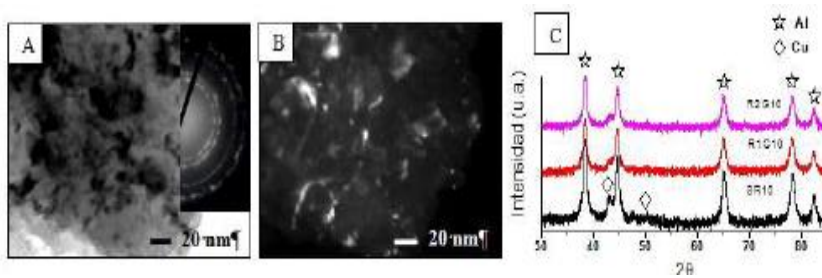


Figura 2.33 a) y b) Micrografías en campo claro y oscuro de TEM y de patrones de difracción de electrones, donde se observa el tamaño promedio del cristal de la matriz y c) Patrón de DRX correspondiente. (5)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

El aspecto que las partículas de grafito adoptan después del proceso de extrusión se muestra en la Figura 2.34. En esta imagen se evidencia que no existe formación de ninguna fase intermetálica en la interface, por el contrario parece ser que el material en esa región se ha vuelto amorfo, debido a la ausencia de ordenamiento mostrado tanto por la matriz, como por el grafito.

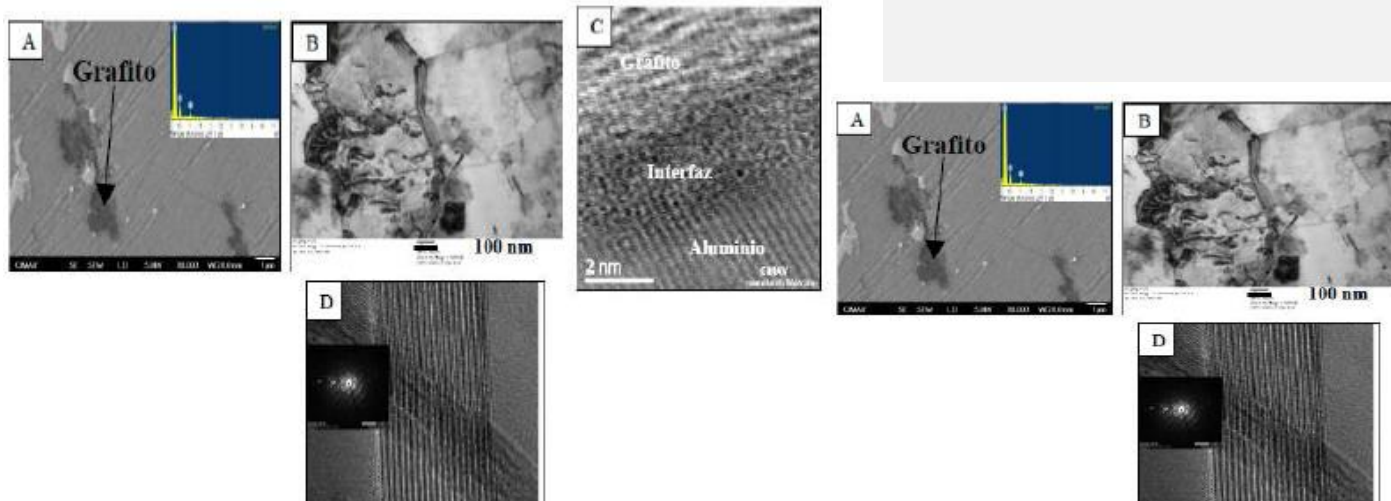


Figura 2.333342.34 a) Micrografía por TEM en la cual se observan partículas de grafito, b), c), y d) Detalles de los componentes extruidos. (5)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

2.6.3.4 Microscopía de Electrones Retrodispersados (EBSD)

Guo et al (27), emplearon la técnica EBSD para llevar a cabo la caracterización de un material MMC AA1100-B4C que fue soldado por FSW, obteniendo como resultado información detallada de la evolución microestructural del compuesto durante el proceso de soldadura. Se aplicó el pulido, tanto mecánico, como por iones para la preparación de muestras para este análisis, con el que fue posible contrastar las diferencias resultantes del método de preparación.

Después de haber soldado las muestras se cortaron las probetas perpendiculares a la soldadura para su caracterización microestructural. Las muestras fueron pulidas mecánicamente y atacadas con 0.5% HF durante 30 s. La primera observación se efectuó por medio de microscopio óptico en luz polarizada, sin embargo, el nivel de detalle no era suficiente para revelar con

exactitud la microestructura presente, por consiguiente, se procedió a preparar las muestras para EBSD utilizando pulido mecánico y por iones.

El proceso de pulido se llevó a cabo de la siguiente manera: posterior al desbaste superficial con un disco de diamante de 40 μm , la muestra fue pulida con pasta de diamante de 15, 9, 6, 3 y 1 μm durante algunos minutos. Para finalizar, se realizó un pulido con sílica coloidal de 0.05 μm por 15 minutos. El pulido por iones se realizó con el uso de un pulidor de sección transversal.

Fue seleccionada una presión de Argón de 170 kPa para la generación de iones. La muestra fue pulida durante 8 horas con 5kV de voltaje de aceleración y aproximadamente 100 mA de corriente de haz. Al finalizar el pulido mecánico, la muestra fue analizada directamente sin el uso de algún tipo de ataque.

En la Figura 2.35 se muestran las imágenes obtenidas resultantes por ambos métodos de preparación, mismas que fueron comparadas posteriormente. Por otra parte, las muestras que fueron sometidas por el proceso de pulido mecánico, se identificó que el rango de incidencia fue de aproximadamente 60% para la matriz, mientras que para el metal base fue de 73%, lo que resulto poco confiable en cuanto a la caracterización de la estructura de grano.

En el caso de las muestras preparadas por pulido de iones, se determinó que el rango de incidencia fue de 93% para la matriz, obteniendo una imagen excepcionalmente clara, tomando en consideración una elevada deformación presente, debido a la naturaleza del proceso de soldadura.

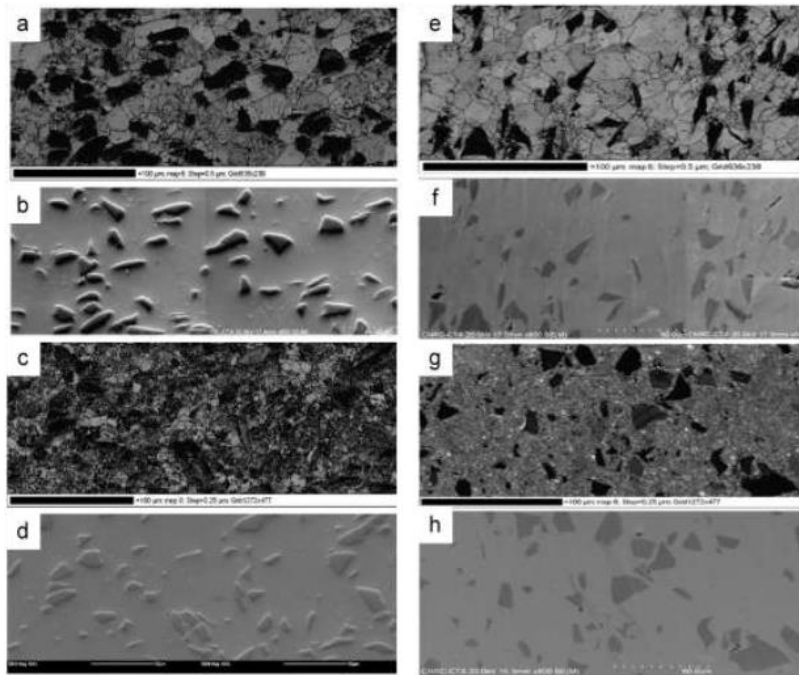


Figura 2.34-2.35 Imágenes por pulido mecánico: a) Mapa de calidad del metal base, b) Imagen correspondiente por electrones secundarios SEM, c) Mapa de calidad de botón de soldadura, d) Imagen correspondiente por electrones secundarios SEM, Imágenes por pulido por iones, e) Mapa de calidad del metal base, f) imagen correspondiente por electrones secundarios SEM, g) Mapa de calidad de botón de soldadura, h) Imagen correspondiente por electrones secundarios SEM. (27)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Para determinar la textura, fue necesario obtener figuras de polos por ESBD, Figura 2.36. Estas imágenes, soportadas por un estudio de espacio 3D de Euler reflejaron 4 componentes planares en el metal base, formados durante el proceso de conformado de material, mientras que en la soldadura se encontraron tres texturas fibrosas producidas por la extrusión en caliente inducida por la herramienta rotacional de FSW.

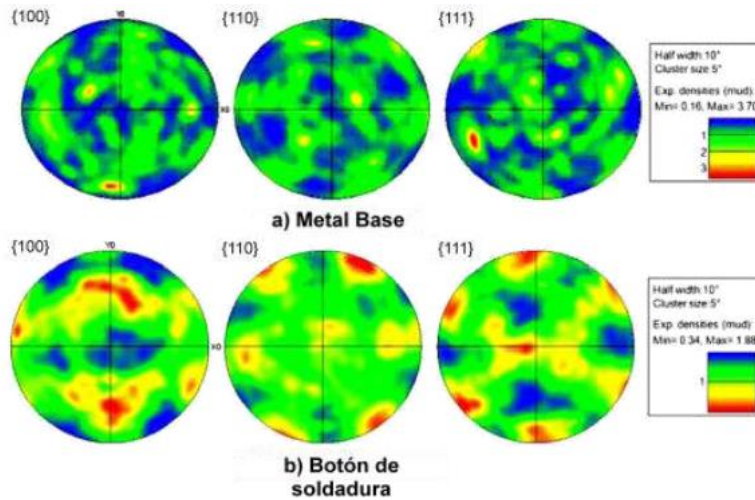


Figura 2.3535362.36 Figuras de polos para las muestras pulidas por iones en a) metal base y b) botón de soldadura. (27)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

De acuerdo a los resultados mencionados anteriormente, las conclusiones a las que se llega es que la caracterización a través de pulido mecánico, no proporciona los detalles suficientes para el análisis de la estructura del grano de la matriz, sin mencionar que el rango de incidencia es insuficiente para permitir una caracterización confiable, especialmente en el botón de soldadura.

Sin embargo, la técnica de EBSD con pulido por iones permitió con éxito la caracterización, tanto del metal base, como del botón de soldadura.

La calidad de esta imagen se atribuye a la perfecta remoción de las capas deformadas de la superficie de la muestra. (27)

2.6- Aplicación del proceso FSW aplicado en AMC reforzados con SiC

2.7 Microestructura del material compuesto A359/SiC/20p

Cuando el material compuesto A359/SiC/20p es sometido a la incorporación de partículas de refuerzos como el SiC es probable que puedan cambiar las condiciones de solidificación con respecto a ~~su~~ la aleación monolítica, es decir, que se puede originar segregación, absorción de gas, morfología del silicio, cinética de la precipitación, distribución de las partículas de refuerzo y reacción química entre las partículas y la matriz de aluminio. (29)

El AMC muestra una buena distribución de las partículas de refuerzo, las cuales se encuentran agrupadas en las regiones interdendríticas, originando una estructura a la cual se le denomina grano duro. [En la figura 2.3644 se muestra una imagen obtenida por microscopía óptica y en la figura 2.3742 un imagen obtenidas por SEM, referente al material A359/SiC/20p T6.](#)

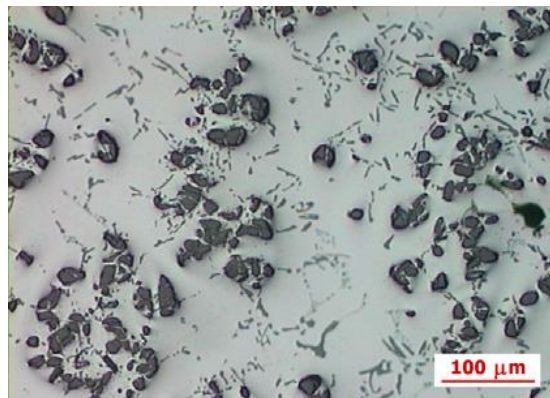


Figura 2.363636442.44 Aglomeración de partículas de SiC en A359/SiC/20p T6. Microscopía óptica. (29)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

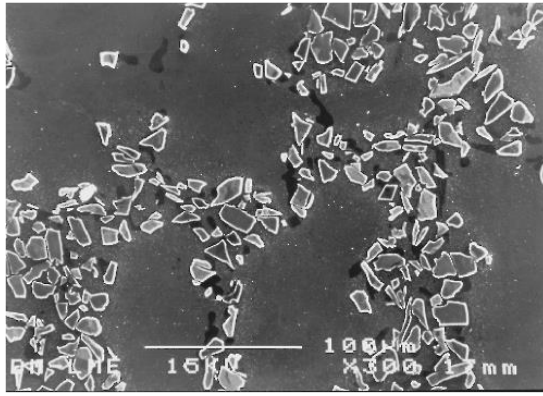


Figura 2.373737422-42 Aglomeración de partículas de SiC en A359/SiC/20p T6. Microscopía electrónica de barrido. (29)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

En las regiones interdendríticas puede ser localizado el silicio eutéctico, tanto en las regiones ocupadas por los grupos de partículas de SiC como en las zonas libres de estas partículas. [En la figura 2.3843 se muestra un metalografía en donde se percibe la distribución de las partículas de SiC y de silicio en el material A359/SiC.](#)

Figura 2.3838432-43 Distribución de las partículas de SiC y de silicio en A359/SiC. (29)

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Código de campo cambiado

Así mismo, se tiene una mejora de la microestructura en el material reforzado con partículas de SiC en comparación con la aleación de aluminio monolítica, con una disminución del tamaño ~~del~~ medio del grano y de las dimensiones de las dendritas.

[En la figura 2.3944 se muestra una comparación entre las microestructura correspondiente a la aleación A359 y el AMC A359/SiC/20p. En la aleación A359 \(a\) está constituida por una fase \$\alpha\$, en forma dendrítica y silicio en forma acircular.](#)

Los compuestos intermetálicos de este material, como el Mg₂Si y compuestos de tipo Al (Fe, Si, Mn) se encuentran localizados en las regiones eutécticas, entre las partículas de Si.

En cambio, la aleación A359/SiC/20_p (b) es un material heterogéneo con una buena distribución de las partículas de refuerzo, concentradas en las regiones interdendríticas, originando la estructura denominada de grano duro, aportando una mejora en cuanto a la dureza del material.

Figura 2.393939442-44 Microestructura de a) A359 y b) A359/SiC/20p. (29)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

CAPÍTULO 3

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA

3.1 Importancia de los procesos de soldadura

Los procesos de soldadura han evolucionado rápidamente, utilizando métodos cada vez más confiables y de bajo costo, pero en sí, cada proceso posee características particulares, aunque todos se caracterizan por la unión de dos materiales, generalmente metales, con el propósito de producir una unión fija. Entonces, se podría decir que en la actualidad, la soldadura es un proceso de fabricación que se aplica a muchas ramas de la actividad industrial, ~~siendo~~ ~~quedonde~~ se utilizan diferentes técnicas de soldadura para la obtención de productos, convirtiéndolo un proceso clave, ya que una buena soldadura determinará ~~en conjunto con~~ otros elementos, la calidad del producto final.

3.2 Compuestos de Matriz Metálica (MMC)

En el caso de los MMC, como ya se mencionó anteriormente en el cuerpo de la presente monografía, no se obtienen los efectos requeridos cuando son sometidos a los procesos de soldadura convencionales como son los de fusión. Una de los principales factores que hay que considerar en los MMC al momento de utilizar soldadura de fusión es la viscosidad, ya que con la presencia de una fase sólida en el baño fundido resulta una viscosidad muy elevada, siendo que en estas condiciones, el baño fundido no fluye ni moja tan fácilmente como en el caso de una aleación sin reforzar, así que, cuando el baño se encuentre parcialmente fundido se hace más susceptible para atrapar gases, originando porosidad, y se reduce la penetración de la soldadura, lo que incrementa los defectos de fusión. Otro de los factores que influye comúnmente es, la interacción entre las dos fases en el baño fundido, ~~ya que por ejemplo~~ en el sistema Al/SiC, cuando el SiC es expuesto al aluminio fundido ~~en~~ ~~durante~~ suficiente tiempo y

temperatura, se puede llegar a la formación de carburos de aluminio consumiendo el refuerzo. Por los efectos mencionados anteriormente, y otros más, los procesos de soldadura convencionales no son aptos para aplicarse en con los MMC.

3.3 Proceso de Soldadura por Fricción – Agitación (FSW)

En el año de 1991 en el Instituto de la Soldadura (TWI), surge un método de soldadura que proporcionaría una solución a los problemas en los MMC sometidos a los métodos de soldadura por fusión. Este nuevo proceso de soldadura no alcanza la temperatura de fusión, siendo que el calor que aplica para realizar la unión se produce mediante la fricción de un hombro giratorio y la agitación del material plastificado por medio de un pin; además, algunos otros factores como la ausencia de una zona de fusión y un elevado porcentaje de recristalización otorgan la posibilidad al proceso FSW de que se convierta en una opción ideal para solucionar el problema en la soldadura de los AMCMMC.

Cabe mencionar que las variables que intervienen dentro del proceso FSW tales como velocidad de rotación, presión, ángulo de inclinación y diseño de la herramienta podrían llegar a afectar de forma considerable el AMCMMC, es por ello que se debe tener un control óptimo de cada una de estas variables, teniendo en cuenta los rangos necesarios para producir uniones que cuenten con propiedades mecánicas requeridas para su aplicación. Por otro lado, el flujo del material y la microestructura en los AMC-MMC son algunos de los principales factores que se han convertido en objeto de estudio debido a la complejidad que se tiene para poder ser identificados, y debido a ello se ha hecho uso de reactivos químicos potentes a fin de revelar las distintas transformaciones que se originan de los procesos de recuperación, recristalización, disolución y precipitación, hasta partículas fluorescentes o radioactivas y polvos, con la intención de

utilizarlos como marcadores rastreables dando lugar a la reproducción de un patrón de flujo.

~~Al FSW, ya que al~~ no alcanzar la temperatura de fusión con FSW, se da lugar a una acción de difusión. ~~También existe~~ una característica que provoca una difícil comprensión del proceso en estado sólido, que de forma contraria en la difusión en estado líquido que es muy común en los procesos de soldadura por arco, conlleva a producir transformaciones diferentes y una acción cinética de transformación complicada.

3.4 Métodos de caracterización microestructural

Los métodos de caracterización microestructural juegan un papel muy importante debido a que el proceso FSW en los AMCMMC, se presentan diversos fenómenos que necesitan ser observados, estos factores son de vital importancia ya que presentan gran relevancia en cuanto al desempeño óptimo del material y/o el mal funcionamiento de su aplicación u operación.

A través de los años se han ido desarrollando diversas técnicas para el análisis microestructural, algunas de ellas se utilizan para llevar un análisis básico y esencial con los que se puede obtener información necesaria respecto a las fases presentes en las soldaduras. Algunas de estas técnicas son microscopía óptica, microscopía ~~óptica-electrónica~~ de barrido, microscopía electrónica de transmisión, difracción de rayos x y la microscopía de electrones retrodispersados.

En las investigaciones que se han realizado respecto a los AMC reforzados con SiC utilizando el proceso FSW y algunas técnicas de caracterización, se han obtenido resultados semejantes, siendo que en todas se ha encontrado la presencia de partículas finas y gruesas de SiC dentro del botón de soldadura, en

combinación con una estructura de grano fino equiaxial recristalizado; en cuanto a la TMAZ la estructura que se muestra es más heterogénea y con una morfología acircular, lo que produce un incremento en la dureza del material que difiere con la HAZ, en la que se visualiza una estructura demasiado semejante al material base, siendo que las propiedades en esta zona coinciden con las referentes a las del material original.

También se debe tomar en cuenta que otro fenómeno de atención en este proceso es la formación de productos de reacción en los AMC. Es sumamente importante lograr la identificación de precipitados intermetálicos (Al_2CuMg), compuestos no solubles (Cu_2FeAl_7) y segundas fases (Al_4C_3), con lo anterior se podría definir y relacionar el comportamiento mecánico de los componentes soldados, utilizando además reactivos de ataque para su caracterización con contenido de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, ácido pícrico, NaOH , HNO_3 , HCl y HF002E

3.5 Aplicación del proceso FSW en la industria automotriz

Como ya se ha mencionado anteriormente, el proceso FSW se ha convertido un método de unión ampliamente implementado en la industria automotriz en algunos países. La meta actual que se pretende alcanzar entre los fabricantes, es buscar reducir el peso de los componentes automotrices con la integración de aleaciones de aluminio demasiado ligeras dentro de sus ensambles y reducir el consumo de energía en sus procesos de unión. Así que para la reducción del peso y mayor resistencia en componentes automotrices, los materiales más aptos para cubrir esta necesidad son los AMC, mientras que para el caso de un proceso de unión que requiera menor consumo de energía el candidato más apto es el proceso FSW, además de que posee otras ventajas en comparación con los métodos de soldadura de fusión convencionales, teniendo ahorros significativos en cuanto a costos se refiere.

2.83.6 Aplicación del proceso FSW en AMC reforzados con SiC

Con formato: Esquema numerado + Nivel: 2 + Estilo de numeración: 1, 2, 3, ... + Iniciar en: 1 + Alineación: Izquierda + Alineación: 0 cm + Sangría: 1.27 cm

En el año 2013 Duman y Bozkurt utilizaron placas con dimensiones de 50 x 150 x 3 mm de una aleación de aluminio 3003, mismas que fueron unidas con un material AMC 2124/SiC/25_p en condición T4 a través del proceso FSW. En la tabla 3.17 se muestra la composición química de los materiales utilizados dentro de esta experimentación. La configuración de unión aplicada en la soldadura de las placas fue a tope, empleando una velocidad de rotación de 900, 1200 y 1400 rpm, con una velocidad de avance de 40, 80 y 125 mm/min, un ángulo de inclinación constante a 2°. (28)

Tabla 3.17 Composición química de las placas de AA2124/SiC/25p-T4 y AA3003-H24. (28)

Material	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Al
AA2124/SiC/25p-T4	3.86	1.52	0.65	0.17	-	93.8
AA3003-H24	0.05	0.12	1.20	0.15	0.46	98.02

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

El material y diseño de la herramienta utilizada fue de acero de alta velocidad, con diámetro de 20 mm del hombro, un diámetro de 6 mm y la longitud de pin de 2.88 mm. Después de que las piezas fueron soldadas fueron seccionadas perpendicularmente en dirección de la unión y se prepararon para efectuarles el análisis visual, enseguida se atacó con el reactivo Keller para observación y análisis de la micrografía a través del SEM. La microdureza y la tensión también fueron evaluados.

Las uniones realizadas en los materiales mencionados anteriormente fueron efectuadas de manera exitosa, libres de porosidad superficial visible o defectos macroscópicos en las regiones superior e inferior, a excepción por una de las

muestras que se soldó a una velocidad de avance de 40 mm/min, en la cual fue posible observar la presencia de porosidad formada en el área de soldadura.

En el caso de la examinación por medio de SEM, no fue posible encontrar porosidad, grietas o desgastes de la herramienta en la zona de agitación de las uniones. En la zona del metal base fue observada una aleación de matriz junto con una distribución uniforme de partículas de SiC tanto gruesas ($<6\mu\text{m}$) como finas ($<3\mu\text{m}$). En la figura [32.137](#) se visualizan las micrografías obtenidas por SEM.

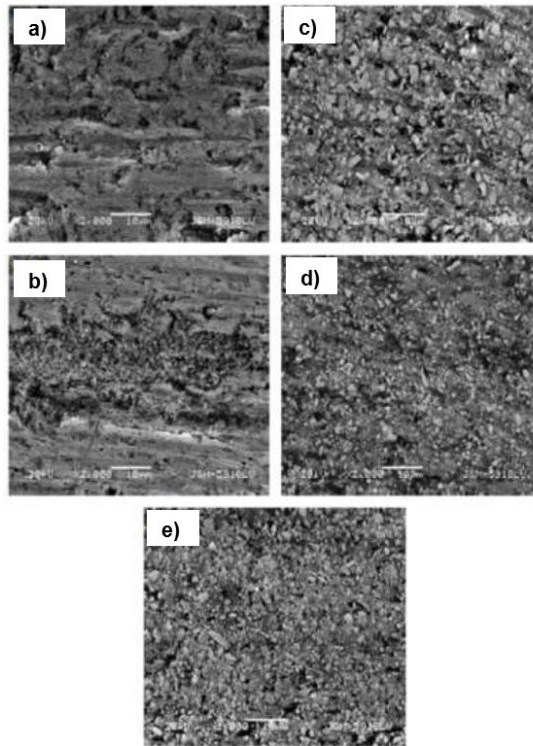


Figura 3.14137 Micrografías en SEM de placas soldadas bajo parámetros de 900/125; a) 3003 BM; b) HAZ 3003; c) TMAZ 3003; d) Zona de agitación 3003 y 2124; e) TMAZ 2124; f) HAZ 2124; g) Metal base 2124. (28)

En la zona agitada fueron localizadas diferentes regiones de Al y material compuesto, mostrando granos equiaxiales finos recristalizados y partículas de SiC distribuidos uniformemente. En el caso de la TMAZ del material 3003-H24, localizado adyacentemente en la zona de agitación, misma que fue producida a 1400/40, se visualizó una distribución no uniforme de partículas de SiC. Finalmente, para la HAZ que se encuentra entre el TMAZ y el metal base, la microestructura obtenida tuvo similitud a la del metal base. En la figura 3.2238 se aprecian las micrografías obtenidas por SEM en referencia a las placas soldadas. (28)

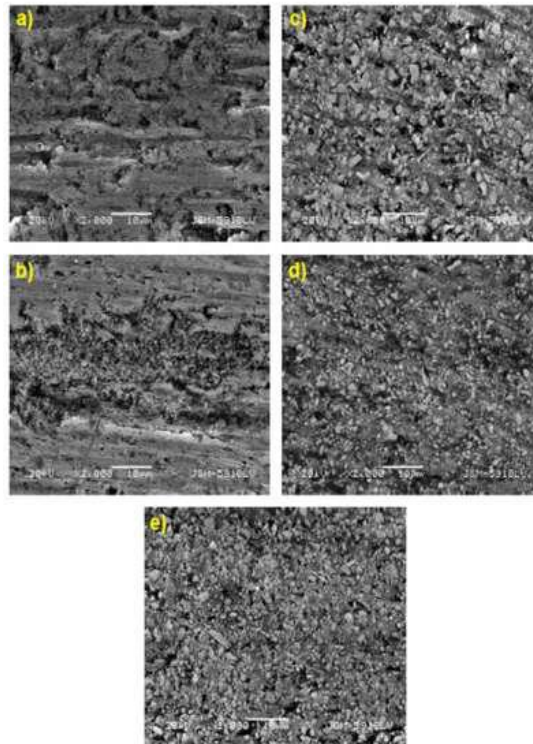


Figura 3.2238 Micrografías en SEM de placas soldadas bajo parámetros de 1400/40; a) HAZ 3003; b) TMAZ 3003; c) HAZ 2124; d) TMAZ 2124; e) Zona de agitación 3003 y 2124. (28)

Los perfiles de microdureza en las uniones mostraron una dureza menor en la zona de agitación. Los resultados obtenidos en la zona de avance (lado AA3003-H24 Al) de HAZ son mayores que en la TMAZ debido al reblandecimiento térmico y el calentamiento por fricción a excepción de la unión producida con los parámetros de soldadura 1400/40. Para esta última unión, la dureza se incrementó por encima de los 80 HV en el lado de avance de la TMAZ por lo que se obtuvo un valor de la eficiencia de la unión menor. En la figura 3.33 se muestran los perfiles de microdurezas de las soldaduras realizadas.

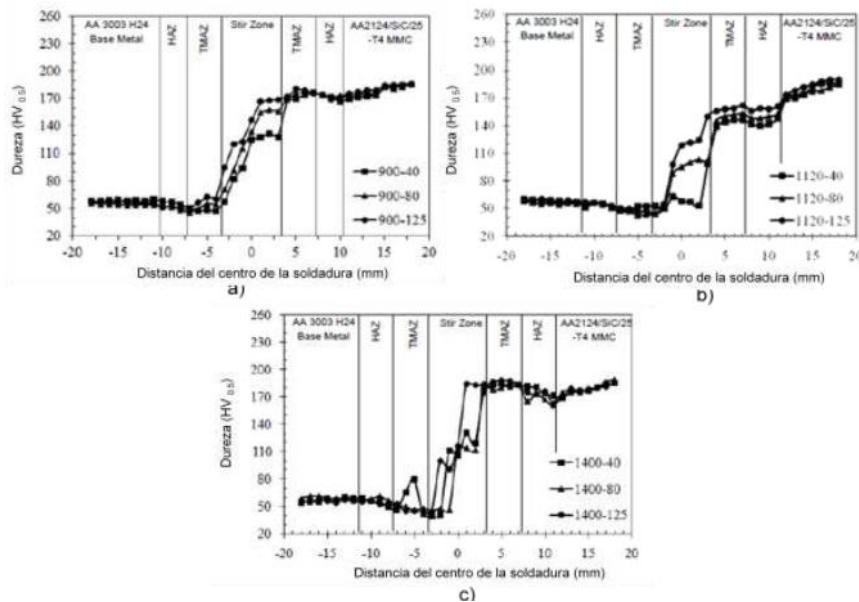


Figura 3.33 Perfiles de microdureza para las soldaduras realizadas bajo parámetros de a) 900/40-125; b) 1120/40-125; c) 1400/40-125. (28)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

En cuanto los resultados de ensayo de tensión, demostraron que una alta calidad de la unión puede ser lograda con parámetros de 900/125. La resistencia a la tensión y los porcentajes de elongación incrementaron conforme aumentaba la velocidad de rotación constante. El valor máximo de eficiencia de la unión a la

tensión obtenida fue de 104% ($UTS_{FSW}/UTS_{BM} * 100$), resultando ser mayor que la resistencia a la tensión de la aleación de aluminio pero mucho menor que la del material compuesto, y por otro lado, la elongación de la unión fue mayor que ambos materiales, especialmente mayor que el material compuesto. En la figura 23.40 se visualizan las probetas de ensayo de tensión después de haber aplicado la soldadura por fricción. (28)

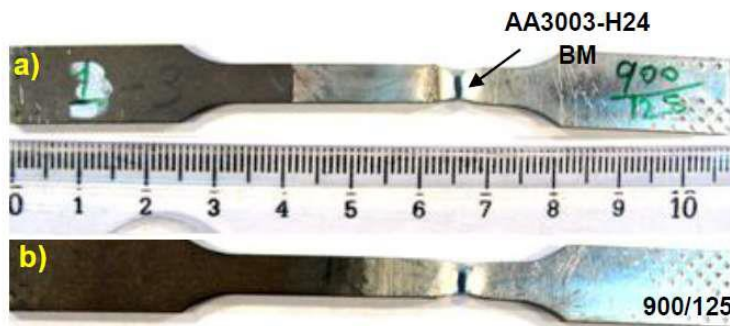


Figura 3.4440 Probetas de ensayo de tensión después de la soldadura por fricción bajo los parámetros de 900/125; a) cara anversa y b) reverso. (28)

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

CAPÍTULO 4

CASO DE ESTUDIO

CARACTERIZACIÓN

**MICROESTRUCTURAL DE LA UNIÓN
DE UNA MATERIAL COMPUESTO DE
MATRIZ METÁLICA DE ALUMINIO
REFORZADO CON PARTÍCULAS DE
CARBURO DE SILICIO**

4.1 Material compuesto de matriz metálica de aluminio

El tipo de material utilizado para realizar el caso de estudio fue una placa elaborada con un compuesto de matriz metálica de aleación de aluminio A359 reforzado con un 20 por ciento en volumen de partículas de carburo de silicio, que de acuerdo a la Aluminum Assosiation se le denomina A359/Sic/20p. En la figura 4.1 se visualiza la placa de AMC. La pieza adquirida contaba con las dimensiones de 300 mm x 300 mm x 5mm de espesor.

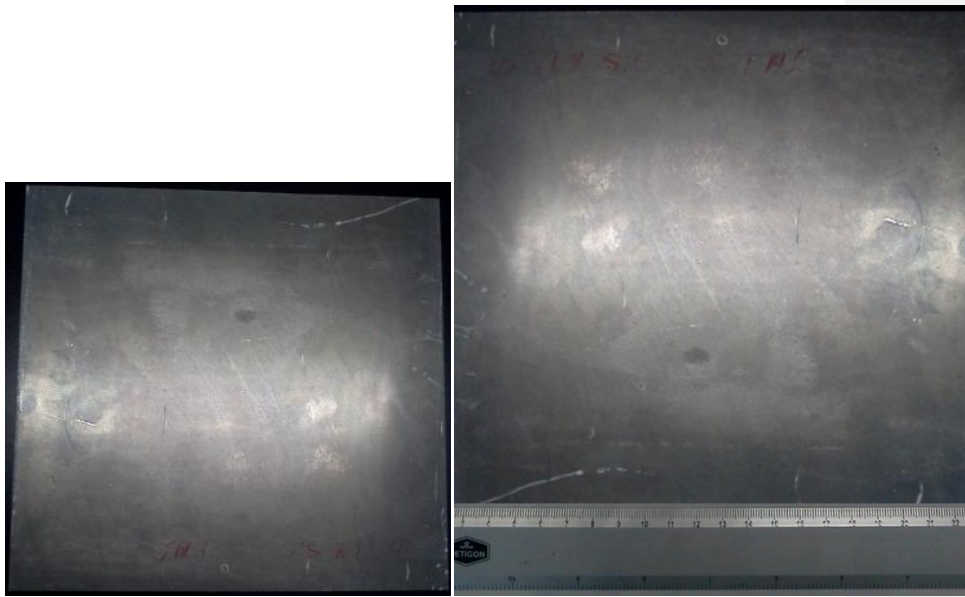


Figura 4.14.1 Placa de compuesto de matriz metálica reforzada con 20 por ciento en volumen de partículas de carburo de silicio (A359/Sic/20_p).

La composición nominal del material AMC se muestra en la tabla 4.1 y por otra parte, en la tabla 4.2 se muestran las propiedades mecánicas que este tipo de material posee.

Tabla 4.1 Composición química (%e. p.) del material A359/SiC/20p. (30)

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Sr	Al
%	0.9	0.10	0.02	0.007	0.58	0.01	0.014	Resto

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Código de campo cambiado

Tabla 4.2 Propiedades mecánicas del material A359/SiC/20p. (30)

% Vol. SiC	Densidad (g/cm ³)	Resist. Tracción (MPa)	Límite Elástico (MPa)	% Elongación	Módulo de Young (GPa)	Conductividad Térmica (W/mK)
10	2.72	175	160	5	100	150

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Código de campo cambiado

Posteriormente, la placa fue cortada en cuatro secciones, obteniendo de esta forma dimensiones de 62 mm x 2 mm x 5 mm de espesor para cada una de las piezas, el material remanente fue utilizado para realizar la caracterización del metal base.

Comentado [YA3]: Se repite en la siguiente sección.

4.2 Caracterización del material compuesto de matriz de aluminio



Figura 4.24.2 Muestras transversal y longitudinal del material base montadas en baquelita.

4.2.1 Preparación y ataque

Las muestras fueron desbastadas mecánicamente utilizando lijas de carburo de silicio con granulometría de 120, 220, 400, 600 y 1200 partículas/in²~~Las muestras fueron desbastadas mecánicamente utilizando lijas de carburo de silicio 120, 220, 400, 600 y 1200~~, posteriormente se sometieron al pulido en paño con pasta de diamante de 1 μm y alcohol. En cada cambio de grado de lija utilizada, fue aplicado un giro de 90° en las muestras, con la finalidad de alternar la dirección del lijado. Además, se aplicó una limpieza en la superficie para evitar residuos que rayaran la superficie.

El pulido de las muestras fue empleado utilizando una pulidora de disco giratorio, después aplicando pasta de diamante, presionando y realizando movimientos oscilatorios para desaparecer las estrías generadas por el lijado realizado previamente.

La superficie de las muestras fue atacada empleando el reactivo Keller (22) durante un tiempo de 15 segundos, para facilitar la observación de la estructura metalográfica del material AMC. La solución de ataque utilizada para revelar la microestructura permite identificar la aleación de la matriz y las partículas de carburo de silicio.

La composición química del reactivo Keller se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Composición química (% e. p.) del reactivo Keller. (22)

Composición	Símbolo	Volumen (ml)	Volumen (%)
Ácido fluorhídrico	HF	2	1
Ácido clorhídrico	HCl	3	1.5
Ácido nítrico	HNO ₃	5	2.5
Agua destilada	H ₂ O	190	95

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

4.3 Soldadura FSW y caracterización del material AMC

4.3.1 Unión FSW en placas del material AMC

La unión ~~mediante~~ de las placas del material AMC fue realizada por el Departamento de Procesos de Unión en Estado Sólido del Centro de Helmholtz-Zentrum Geesthacht (Helmholtz-Zentrum Geesthacht - Solid State Joining Processes Department), mediante un equipo utilizado para el proceso FSW, utilizando una herramienta de HSS High Temperature, el cual cuenta con un diámetro de hombro de 20 mm y un pin con diámetro de 8 mm. Para llevar a cabo la unión de las placas de AMC, solamente fue necesario aplicar las variables principales: velocidad de rotación, velocidad de soldadura y presión axial.

Se realizaron 3 uniones de soldadura por el proceso FSW (Figura 4.3), utilizando distintas combinaciones de parámetros, mismos que se mencionan en la tabla 4.4.



Figura 4.3.4.3 Uniones de soldadura en placas del material AMC elaborados con distintos parámetros de soldadura FSW.

Tabla 4.4 Parámetros de soldadura por FSW en placas de AMC

Unión	Velocidad de Rotación (rpm)	Velocidad de Soldadura (mm/min)	Fuerza Axial (kN)
1	1000	6	8
2	1000	6	10
3	1200	6	10

4.3.2 Caracterización de la unión en placas del material AMC

La placa de AMC unidas por FSW fueron cortadas, para tomar una muestra de cada unión (Figura 4.4) y posteriormente montarlas en baquelita.

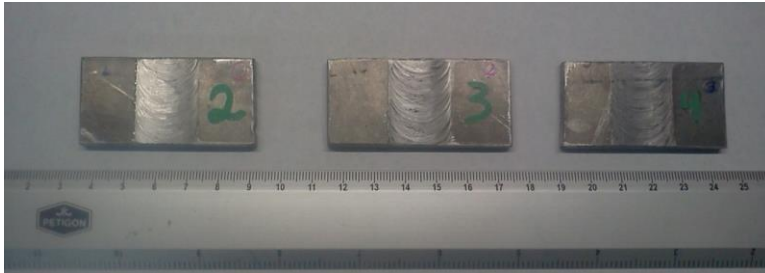


Figura 4.4.4 Corte de placas previo a su montaje en baquelita.

Las tres muestras se desbastaron mecánicamente empleando para ello lijas de carburo de silicio 120, 220, 400, 600 y 1200, después fueron pulidas en paño con pasta de diamante de $1\ \mu\text{m}$ y alcohol. Posteriormente, se aplicó una limpieza en la superficie con la finalidad de eliminar los residuos que llegarán a rayar las muestras.

En el proceso de pulido de las muestras se utilizó una pulidora de disco giratorio, después se aplicó pasta de diamante, presionando y realizando movimientos oscilatorios para eliminar las estrías generadas por el lijado que se efectuó previamente.

La superficie de las muestras fue atacada con reactivo Keller durante 15 segundos, seguido de un enjuague en agua y alcohol, finalizando con secado de aire tibio y de esta manera facilitar la observación de la estructura metalográfica de las uniones del material AMC. La composición química del reactivo Keller se muestra en la tabla 4.3 previamente indicada.

Una vez aplicado el ataque de las muestras, se utilizó el microscopio óptico y el microscopio electrónico de barrido para obtener las micrografías correspondientes.

[Por otro lado, se realizó la prueba de dureza para cada una de las muestras unidas mediante el proceso FSW, con la finalidad de evidenciar las variaciones a lo largo de la unión.](#)

4.4 Resultados

4.4.1 Microestructura de Material Base de AMC.

La microestructura de la unión de las muestras transversal y longitudinal del material AMC A359/SiC/20_p, obtenidas mediante microscopía óptica, se visualizan en las figuras 4.5 y 4.6, respectivamente. En las micrografías se puede observar la matriz de la aleación de aluminio en fase alfa, además se revela la presencia de partículas de carburo de silicio distribuidas homogéneamente.

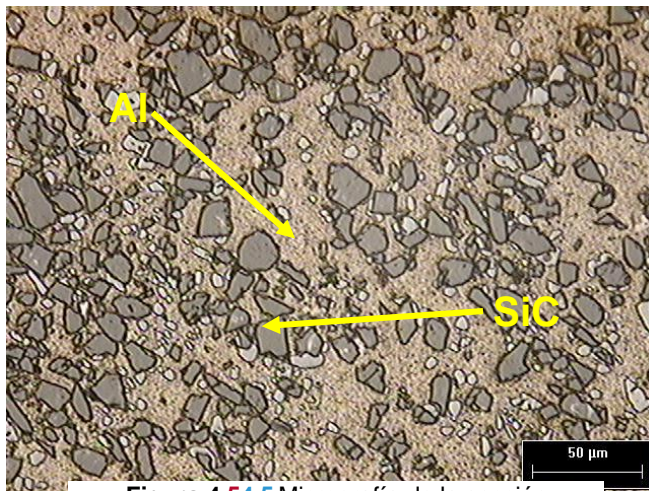


Figura 4.54.5 Micrografía de la sección transversal del material base (A359/SiC/20_p).

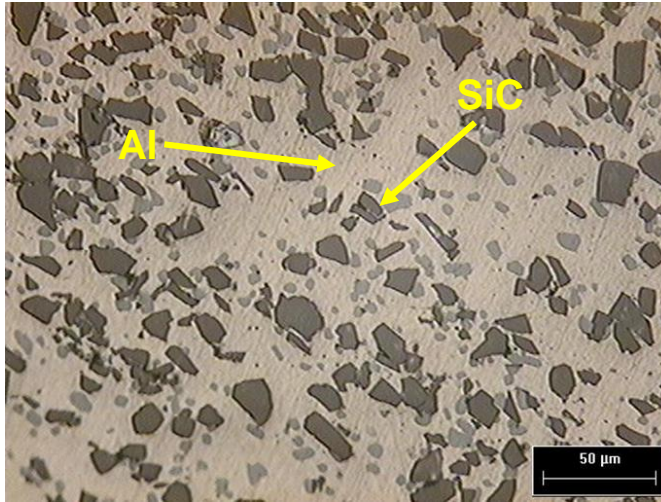


Figura 4.64.6 Micrografía de la sección longitudinal del material base (A359/SiC/20_p).

4.4.2 Microestructura de la unión del Material de AMC

De las tres muestras de soldadura se realizó el ataque utilizando el mismo reactivo en diferentes tiempos para cada una de ellas, quedando de la siguiente forma: la primera muestra fue atacada con reactivo durante 10 segundos, en cuanto a la segunda muestra fue atacada por un tiempo de 7 segundos y la última muestra fue sometida al reactivo durante 5 segundos.

En la figura 4.7 se visualizan las imágenes del perfil transversal de las muestras atacadas.

Como se mencionó anteriormente, fue necesario llevar a cabo el uso de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido con la finalidad de analizar los cambios microestructurales que se presentan en el botón de soldadura, en la zona afectada termo-mecánicamente afectada y la zona afectada por el calor.

En la figura 4.8 y 4.9 se aprecian las micrográficas obtenidas por microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, que corresponden a las 3 muestras de soldaduras, indicando las zonas en la soldaduras mencionadas anteriormente, así mismo, en estas imágenes se revela el botón de soldadura, la cual es característica de este tipo de soldadura, debido a al flujo del material durante el proceso de unión.

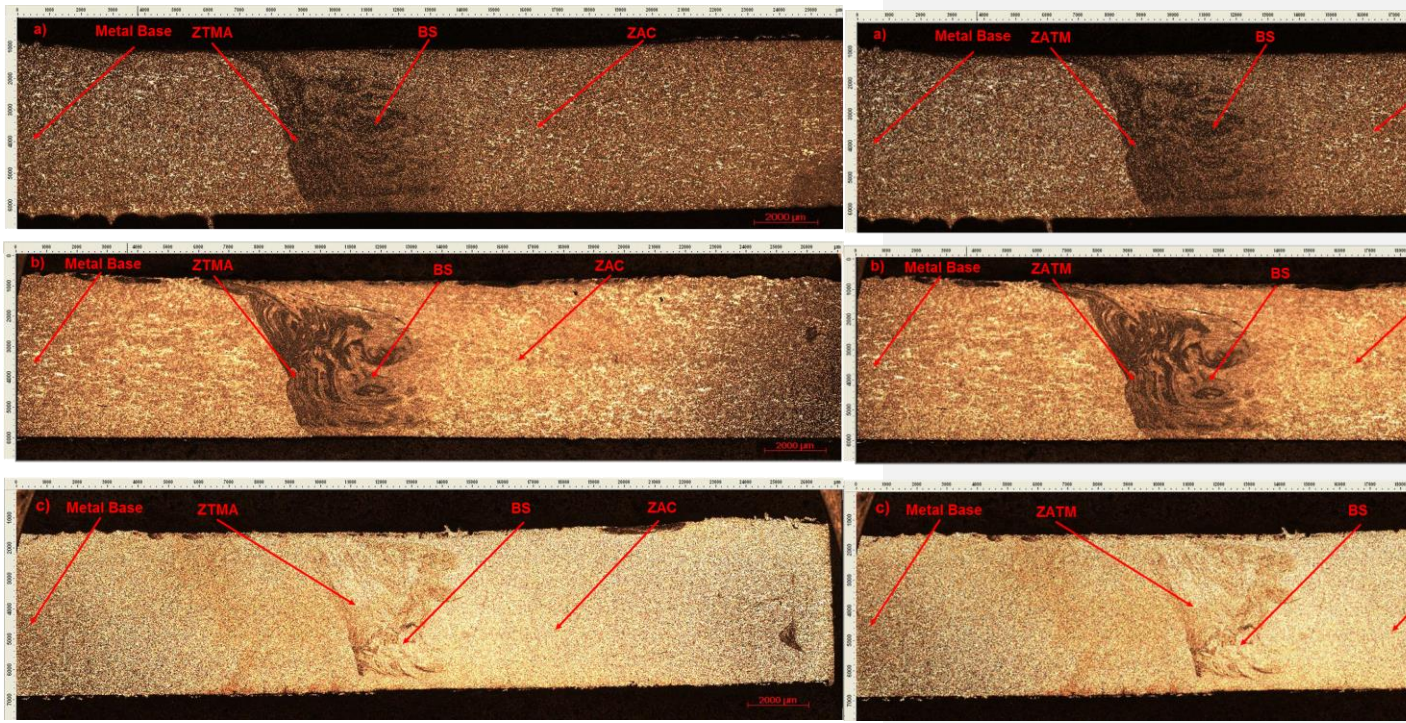


Figura 4.74.7 Microscopía óptica del perfil de soldadura de las muestras (a) atacada durante 10 s, (b) atacada durante 7 segundos, y (c) atacada durante 5 segundos.

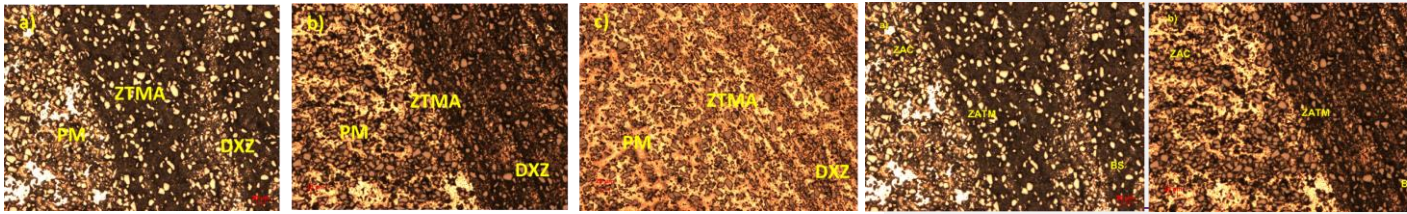


Figura 4.8.4.8 Microscopía óptica del perfil de soldadura de las muestras (a) 1 atacada durante 10 s, (b) 2 atacada durante 7 segundos, y (c) 3 atacada durante 5 segundos.

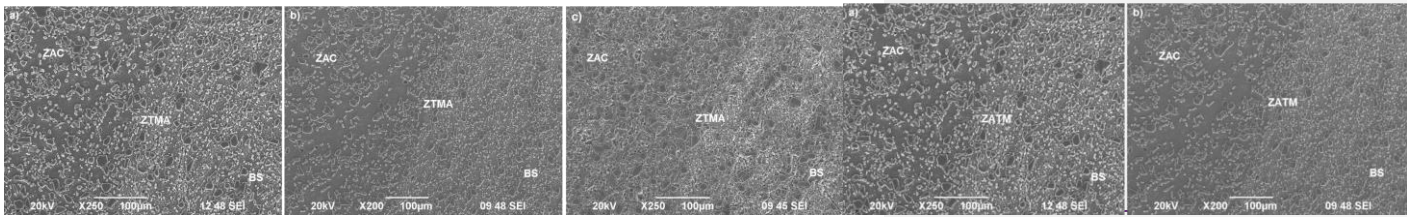


Figura 4.9.4.9 Micrografías obtenidas mediante SEM en las que se muestran la zona afectada por el calor, la zona afectada termo-mecánicamente afectada y el botón de soldadura (zona agitada) correspondientes a la muestra 1 (a), muestra 2 (b) y muestra 3 (c).

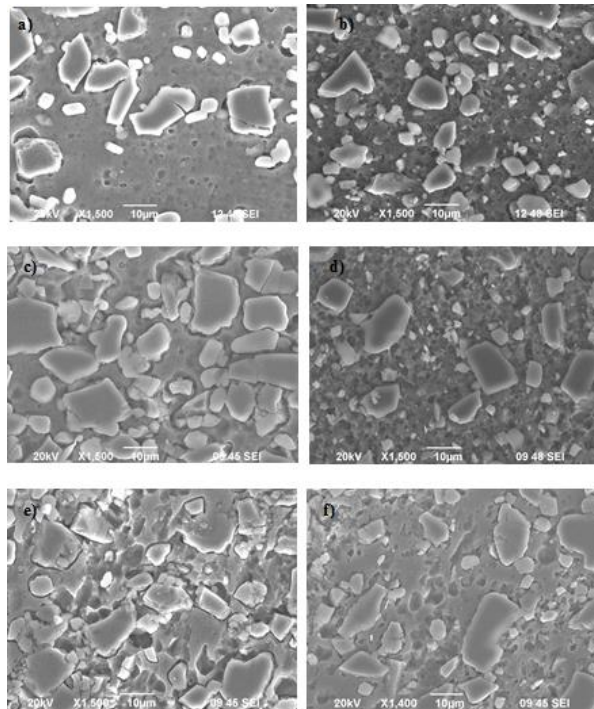


Figura 4.10 Diferencia en el tamaño de las partículas de carburo de silicio entre el metal base y la zona de agitación para la muestra 1 (a y b respectivamente), muestra 2 (c y d respectivamente) y muestra 3 (e y f respectivamente)

En la zona afectada termo-mecánicamente afectada se muestra diferente tipo de comportamiento en cuanto a las partículas en las distintas zonas de la soldadura. AEn algunas partículas localizadas en la zona de agitación (botón de soldadura) -se encuentran fracturadas en comparación con el metal base, la zona afectada por el calor y la zona afectada termo-mecánicamente afectada, esto se observa en la figura 4.10.

La fractura de las partículas en este tipo de uniones resulta en efecto positivo, de tal forma que las partículas más pequeñas estimulan la recristalización actuando como sitios de nucleación para granos nuevos, permitiendo así la

formación de una estructura de granos más finos. Las partículas mucho más finas y más granulares debido a la colisión sólida a baja temperatura, siendo ~~un~~ resultado de una ~~difficil~~ deformación plástica compleja.

La velocidad de rotación tiene la misma influencia como lo tiene la velocidad de soldadura en la velocidad del flujo plástico y la entrada de calor, por lo tanto, la fractura de partículas disminuye del centro de la soldadura hacia la zona ~~afectada~~ termo-mecánicamente afectada y también hacia el metal base. No existe fractura de partículas en el metal base y también la microestructura es diferente comparada con la zona de agitación de las 3 muestras de soldadura.

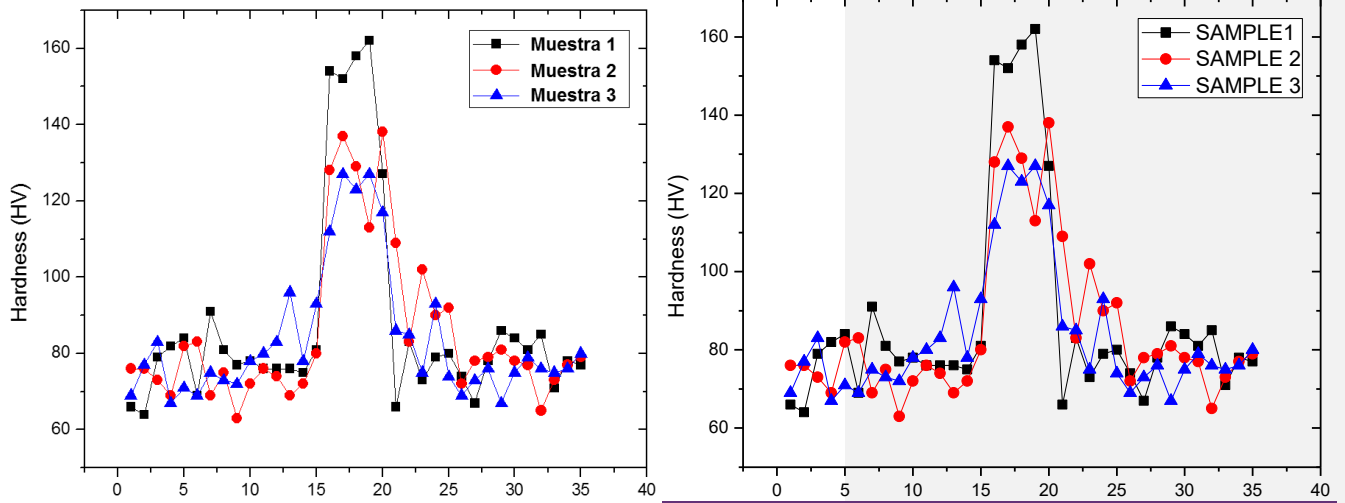
Las imágenes obtenidas por el SEM en la figura 4.9 (a, b y c) de la zona de agitación obtenidas a diferente velocidad de rotación de la herramienta y fuerza axial, pero a una velocidad de soldadura constante de 6 mm/min. A cualquier velocidad de rotación aplicada, el tamaño de las partículas de carburo de silicio en la zona de agitación es más pequeño que en las otras zonas de la soldadura.

4.4.3 Evaluación de microdureza en la unión del Material de AMC

En la figura 4.11 se muestra la evaluación de microdureza llevadas a cabo a lo largo del centro de la sección cruzada de la soldadura. De acuerdo a la microestructura de la muestra 1, la cual tiene la fuerza axial más baja resultando con un elevado valor de dureza para el botón de soldadura.

En general, el botón de soldadura de las tres muestras alcanzó los valores más elevados de microdureza. La zona de recristalización presento valores bajos de microdureza debido a la recristalización de las partículas de SiC, más finas y

[más granulares debido a las colisiones sólidas a bajas temperaturas debido a la deformación plástica generada por el proceso de FSW.](#)



[Figura 4.114141](#) Perfil de dureza en la sección transversal del compuesto Al/SiC.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Los procesos de soldadura han evolucionado rápidamente, utilizando métodos cada vez más confiables y de bajo costo, pero en sí, cada proceso posee características particulares, aunque todos se caracterizan por la unión de dos materiales, generalmente metales, con el propósito de producir una unión fija.

De acuerdo a la información descrita en la literatura se puede concluir los siguientes aspectos:

- En el proceso FSW, los diferentes parámetros tales como velocidad de rotación, velocidad de soldadura, fuerza de inmersión, ángulo de inclinación, geometría de la herramienta, material de la herramienta, velocidad de enfriamiento, torque, potencia y fuerza de dirección, tienen distintos efectos en los AMC al ser sometidos a este proceso de soldadura, pero en sí, los primeros cuatro parámetros mencionados anteriormente y que son consideradas como las variables independientes, juegan un rol significativo para producir uniones soldadas sanas en los materiales.
- El material A359/SiC/20_p presenta una buena distribución de las partículas de refuerzo cerámico, concentradas en las regiones interdendríticas, originando de esta forma una estructura denominada de grano duro. El silicio eutéctico se encuentra en las regiones

interdendríticas, tanto en las regiones ocupadas por aglomerados de SiC como en las zonas libres de dichas partículas.

- La velocidad de avance menor a 25 mm/min presenta una tendencia a generar porosidad en la interfaz matriz/cerámico y mayor a 85 mm/min genera pérdida de material, así que la velocidad de avance debe permanecer dentro de este rango, además se recomienda se apliquen junto con velocidades de rotación mayores a 1000 y menores a 1400 rpm y una fuerza axial mayor a 3 y menor a 7 kN.
- En el centro de las piezas soldadas de AMC se genera una zona direccionalmente recristalizada causada por el flujo del material durante la unión. Dentro de esta misma zona se ~~muestra-encuentran~~ partículas de SiC fracturadas ~~comparándolas-comparables~~ con las partículas de la TMAZ. La fractura de las partículas en este tipo de uniones resulta en un efecto positivo, ~~desde-siendo este el de~~ que las partículas pequeñas estimulan la recristalización actuando como nuevos sitios de nucleación de granos, llevando a la formación de una estructura de granos más finos a temperatura ambiente.
- La microdureza siempre aumentó en el botón de soldadura para las 3 muestras, y fue del metal base hacia el botón de soldadura. Este comportamiento se debe principalmente debido al refinamiento de la matriz de aluminio y la ruptura de las partículas de SiC las cuales se encuentran distribuidas más homogéneamente en esta zona.

BIBLIOGRAFÍA

1. **B.T. Gibson, D.H. Lammlein, T.J. Prater, W.R. Longhurst, C. D. Cox, M.C. Ballun, K.J. Dharmaraj, G.E. Cook, A. M. Strauss.** *Friction Stir Welding: Process, automation, and control. Journal Of Manufacturing Processes.*
2. **Mortensen, S. Suresh.** *Functionally Graded Metals and Metal-Ceramic Composites: Part 1 Processing. International Materials Reviews Vol. 40, pp. 239-265.* 1995.
3. **Subra Suresh, Adrea Mortensen, Alan Needleman.** *Fundamentals of Metal-Matrix Composites.* 1993.
4. **P. Cavaliere, G.L. Rossi, R. Di Sante, M. Moretti.** *Thermoelasticity for evaluation of fatigue behaviour of 7005/Al2O3/10p metal composite sheets joined by FSW.* 2007.
5. **Hernández, J. L., y otros.** *Caracterización por MET de materiales compuestos fabricados por metalurgia de polvos con matriz de grafito y reforzados con grafito. Hernández, J. L., y otros.* 2010.
6. **Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney.** *Friction Stir Welding and Processing.* s.l. : ASM International, 2007.
7. **R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia.** *Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties.* s.l. : Elsevier, 2008.
8. **González, C.** *Análisis Madrid. González, C.* 2009.
9. **Donaldson, L., Miracle, D.** *ASM Handbook. Donaldson, L., Miracle, D.* 2001, Vol. 21.
10. **Smith, W.F.** *Fundamentos de la Ciencia en Ingeniería de Materiales.* 2004.
11. **Davis, J.R.** *Aluminium and Aluminium Alloys. ASM Specialty Handbook.* 1998.
12. **Rodríguez, María Dolores Escalera.** *Soldadura de materiales compuestos de matriz metálica con refuerzo discontinuo: soldadura por fusión y soldadura fuerte.* Madrid : s.n., 1997.

Con formato: Justificado

Con formato: Fuente: Sin Negrita

13. **Rodríguez, Ma. Dolores Escalera.** Biblioteca UCM. [En línea] Septiembre de 1997. <http://biblioteca.ucm.es/tesis/19972000/X/0/X0039501.pdf>.
14. **J.A Aguilar-Martínez, M. I. Pech-Canul, M. Rodríguez Reyes, J.L. de la Peña.** *Effect of Mg and SiC Type on the Processin of Two-Layer al/SiCp Composites by Pressureless Infiltration.* 2004.
15. **Sagar R., Madan P., Kumar M., Sachdeva S.** *Isostatic compaction of silicon carbide. aluminum. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials.* ~~Sagar R., Madan P., Kumar M., Sachdeva S.~~ 1992.
16. **Cesar Edil da Costa, Francisco Velasco López y José Manuel Torralba Castelló.** *Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades y aplicaciones.* 2000.
17. **Neelima Devi. C., Mahesh.V., Selvaraj.** *Mechanical characterization of Aluminium silicon carbide composite.* ~~Neelima Devi. C., Mahesh.V., Selvaraj.~~ **N 3.** 4, 2011, 2010, Vol. 1.
18. **Hatch, John E.** *Properties and Physical Metallurgy.* s.l. : ASM International, 1984.
19. **Smith B., W. Crusan W., Hootman J., Hinrichs J., Heideman R., Noruk J.** *FRICION STIR WELDING IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY.* ~~Smith B., W. Crusan W., Hootman J., Hinrichs J., Heideman R., Noruk J.~~
20. **Thomas M., Kallee S., Staines D. and Oakley P.** TWI. *Friction Stir Welding - Process variants and developments in the automotive industry.* [En línea] Abril de 2006. <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-process-variants-and-developments-in-the-automotive-industry-april-2006/>.
21. **Louthan, M.** *Metallographic Techniques; Optical Metallography.* ~~Louthan, M.~~ 1998.
22. **Vander Voort, George F.** *Metallographic techniques. Optical Microscopy.* ~~Vander Voert, George F.~~ 1998,
23. **Farnsworth, Paul B.** *Optical and X-Ray spectroscopy.* ~~Farnsworth, Paul B.~~ 1998.
24. **Schwartz, Adam J., Kumur, Mukul y Adams, Brent L.** *Electron Backscatter Diffractio in.* ~~Schwartz, Adam J., Kumur, Mukul y Adams, Brent L.~~ 2000,
25. **A.C. Somasekharan, L.E. Murr.** *Microstructures in friction-stir welded dissimilar magnesium alloys.* ~~A.C. Somasekharan, L.E. Murr.~~ s.l. : ELSEIVER, 2004.
26. **M. Emamy, S.E. Vaziri Yeganeh, A. Razaghian, K. Tavighi.** *Microstructures and tensile properties of hot-extruded Al matrix.* ~~M. Emamy, S.E. Vaziri Yeganeh, A. Razaghian, K. Tavighi.~~ s.l. : ELSEIVER, 2013.

27. **Guo, J., y otros.** *Effect of the surface preparation techniques on the EBSD analysis of a friction stir welded AA1100-B4C metal matrix composite.* **Guo, J., y otros.** s.l. : ELSEVIER, 2011.

28. **Duman, Yahya Bozkurt and Serdal.** The effect of welding parameters on the mechanical and microstructural properties of friction stir welded dissimilar AA 3003-H24 and 2124/SiC/25p-T4 alloy joint.

29. **Martín, Enrique.** aluminio, Efecto de la microestructura en las propiedades de materiales compuestos base. 2007.

30. **Yulong Li, K.T. Ramesh a, E.S.C. Chin.** The mechanical response of an A359/SiCp MMC and the A359 aluminum matrix to dynamic shearing deformations. 2004. Vols. 382 (2004) 162–170.

Figuras

<u>Figura 1.1 Fuerzas impulsoras de los cambios en las industrias del transporte. (1)</u>	<u>544</u>
<u>Figura 2.1 Proceso FSW. (1)</u>	<u>141312</u>
<u>Figura 2.2 FSW aplicado entre dos láminas de aluminio y b) herramienta con pin de rosca . (1)</u>	<u>151313</u>
<u>Figura 2.5 Tipos de juntas comunes: tope cuadrado, traslape y unión en T. (1)</u>	<u>185</u>
<u>Figura 2.6 Herramienta con a) hombro esférico enrollado y pin cilíndrico roscado. (1)</u>	<u>191716</u>
<u>Figura 2.7 Diferentes tipos de hombro utilizados para mejorar el flujo de material y eficiencia del hombro. (1)</u>	<u>221918</u>
<u>Figura 2.8 Aumento de temperatura al incrementar velocidad de rotación. (1)</u>	<u>23221</u>
<u>Figura 2.9 Representación esquemática del método de procesamiento por infiltración espontánea. (14)</u>	<u>363332</u>
<u>Figura 2.10 Representación esquemática del método de procesamiento por infiltración asistida. (14)</u>	<u>363332</u>
<u>Figura 2.11 Representación esquemática del método de procesamiento por dispersión. (14)</u>	<u>373433</u>
<u>Figura 2.12 Representación esquemática del método de procesamiento por atomización. (14)</u>	<u>383634</u>
<u>Figura 2.13 Representación esquemática del método de procesamiento <i>in situ</i>. (14)</u>	<u>393735</u>
<u>Figura 2.14 Refuerzos empleados en compuestos de matriz metálica: partículas, fibras cortas (whiskers) y fibras continuas. (16)</u>	<u>464442</u>
<u>Figura 2.15 Brazo automotriz fabricado de extrusiones soldadas por FSW. (19)</u>	<u>575452</u>
<u>Figura 2.16 Estampados. (19)</u>	<u>585553</u>
<u>Figura 2.17 Soldadura a tope de espesores disimiles. 1 mm a 2 mm de la aleación 6111 – T4. (19)</u>	<u>585653</u>

Con formato: Justificado

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Figura 2.18 Tailored blank soldado por FSW producido de la serie de aluminio 6000 en 1998. TWI, BMW, Land Rover. (20).....	595754
Figura 2.19 Consola de aluminio soldada por FSW para el depósito de combustible del Ford GT. (20)	605855
Figura 2.20 Soldadura por FSW aplicada en la consola central del Ford GT. (20)	605855
Figura 2.21 Suspensión trasera soldada por FSW para las limosinas Lincoln. (20)	615956
Figura 2.22 Producción de FSW en asientos traseros del carro Volvo. (20).....	615956
Figura 2.23. FSSW para las puertas traseras del Mazda RX-8. (20)	626057
Figura 2.24. Robots de FSW aplicados en partes automotrices. (20)	626057
Figura 2.25 Prototipo de un sistema de cuna por FSW. (20)	636458
Figura 2.26 Etapas del electropulido. (a) La muestra rugosa debe ser (b) pulida, (c) suavizada, y (d) adelgazada uniformemente. (22)	777572
Figura 2.27 Acción fina de electropulido. Una película viscosa (V) se forma entre la muestra (S) y el electrolito (E); los puntos más elevados tienen un camino de difusión menor a través de la capa y pulen más rápidamente. (22)	787673
Figura 2.28 Técnica de la ventana. La lámina se sujeta con pinzas y se recubre con laca; después de ello forma el ánodo en la celda electrolítica. (21) ...	797774
Figura 2.29 Análisis de una soldadura FSW realizada en una aleación de Al 6061-T6 y Mg AZ91D. a) Zona de soldadura (WZ) y lado de retroceso de soldadura (R); b) régimen ampliado de a); c) régimen ampliado de WZ en el lado de avance; d) régimen que muestra la unión de una fase dura y una fase suave; e) y f) análisis de la unión de Al-Mg; zona de soldadura mostrando la confluencia (zona 3) de los eutécticos e intermetálicos (zona 1) y las áreas más suaves (zona 2) a pesar de la interfaz continua entre ambos. (25)	848178
Figura 2.30 Micrografías por SEM del material de MMC de Al-15%Mg ₂ Si con diferentes contenidos de Cr: a) 0%, b) 0.5%, c) 1%, d) 2%, e) 3% y f) 5%. (26)	858279
Figura 2.31 Micrografía de fractura típica en una superficie de fractura en un material MMC Al-Mg ₂ Si sin contenido de Cr. (26)	868380
Figura 2.32 Superficies de fractura de Al-15%Mg ₂ Si con a) 0.5% Cr, b) 1% Cr, c) 3% Cr. (26)	878481
Figura 2.33 a) y b) Micrografías en campo claro y oscuro de TEM y de patrones de difracción de electrones, donde se observa el tamaño promedio del cristal de la matriz y c) Patrón de DRX correspondiente. (5)	888582
Figura 2.34 a) Micrografía por TEM en la cual se observan partículas de grafito, b), c), y d) Detalles de los componentes extruidos. (5)	898683
Figura 2.35 Imágenes por pulido mecánico: a) Mapa de calidad del metal base, b) Imagen correspondiente por electrones secundarios SEM, c) Mapa de calidad de botón de soldadura, d) Imagen correspondiente por electrones secundarios	

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

SEM, Imágenes por pulido por iones, e) Mapa de calidad del metal base, f) imagen correspondiente por electrones secundarios SEM, g) Mapa de calidad de botón de soldadura, h) Imagen correspondiente por electrones secundarios SEM. (27)	918885
Figura 2.36 Figuras de polos para las muestras pulidas por iones en a) metal base y b) botón de soldadura. (27)	928986
Figura 2.37 Aglomeración de partículas de SiC en A359/SiC/20p T6. Microscopía electrónica de barrido. (29)	1019488
Figura 2.38 Distribución de las partículas de SiC y de silicio en A359/SiC. (29)	1029488
Figura 2.39 Microestructura de a) A359 y b) A359/SiC/20p. (29)	1039289
Figura 3.1 Micrografías en SEM de placas soldadas bajo parámetros de 900/125: a) 3003 BM; b) HAZ 3003; c) TMAZ 3003; d) Zona de agitación 3003 y 2124; e) TMAZ 2124; f) HAZ 2124; g) Metal base 2124. (28)	1119996
Figura 3.2 Micrografías en SEM de placas soldadas bajo parámetros de 1400/40: a) HAZ 3003; b) TMAZ 3003; c) HAZ 2124; d) TMAZ 2124; e) Zona de agitación 3003 y 2124. (28)	11240097
Figura 3.3 Perfiles de microdureza para las soldaduras realizadas bajo parámetros de a) 900/40-125; b) 1120/40-125; c) 1400/40-125. (28)	11340498
Figura 3.4 Probetas de ensayo de tensión después de la soldadura por fricción bajo los parámetros de 900/125; a) cara anversa y b) reverso. (28)	11440299
Figura 4.2 Muestras transversal y longitudinal del material base montadas en baquelita.	119405402
Figura 4.3 Uniones de soldadura en placas del material AMC elaborados con distintos parámetros de soldadura FSW.	121407404
Figura 4.4 Corte de placas previo a su montaje en baquelita.	122408405
Figura 4.5 Micrografía de la sección transversal del material base (A359/SiC/20p).	123410407
Figura 4.6 Micrografía de la sección longitudinal del material base (A359/SiC/20p).	124410407
Figura 4.7 Microscopía óptica del perfil de soldadura de las muestras (a) atacada durante 10 s, (b) atacada durante 7 segundos, y (c) atacada durante 5 segundos.	127412409
Figura 4.9 Micrografías obtenidas mediante SEM en las que se muestran la zona afectada por el calor, la zona termo-mecánicamente afectada y el botón de soldadura (zona agitada) correspondientes a la muestra 1 (a), muestra 2 (b) y muestra 3 (c).	128413410
Figura 4.10 Diferencia en el tamaño de las partículas de carburo de silicio entre el metal base y la zona de agitación para la muestra 1 (a y b respectivamente), muestra 2 (c y d respectivamente) y muestra 3 (e y f respectivamente)	129413410
Figura 4.11 Perfil de dureza en la sección transversal del compuesto Al/SiC. 1302	
Figura 1.1 Fuerzas impulsoras de los cambios en las industrias del transporte. (1)4	

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 12 pto

Cronograma ETSI

|

125

