



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE INVESTIGACION EN METALÚRGIA Y
MATERIALES**

**“ESTUDIO COMPARATIVO DE LA SOLDADURA
DE UN MATERIAL COMPUESTO
COMERCIAL A-359/20%SiC_p POR MEDIO
DE LA APLICACIÓN DIRECTA E
INDIRECTA DEL ARCO ELÉCTRICO”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN METALURGIA Y CIENCIAS DE LOS MATERIALES**

PRESENTA:

ING. JUAN JESÚS VILLALÓN LÓPEZ

ASESOR:

DR. EGBERTO BEDOLLA BECERRIL

MORELIA, MICH., FEBRERO DE 2015

Resumen

Por medio del proceso de soldadura con protección de gas y electrodo metálico consumible (GMAW por sus siglas en inglés) se realizó la soldadura de un material compuesto con matriz de aluminio, A-359, reforzado con 20% (en volumen) de partículas de SiC. Debido a la alta reactividad entre el aluminio líquido y el SiC, lo cual representa una limitante en la soldadura por fusión de estos materiales, se llevó a cabo una comparación entre el uso del arco eléctrico directo e indirecto (AED y AEI respectivamente), lo cual implica diferentes diseños de juntas. El diseño para AED es una junta en simple V, mientras que para AEI se tiene una junta con bordes cuadrados y unas placas delgadas de material de aporte en su parte superior donde se aplica el arco eléctrico. Las soldaduras fueron hechas sobre placas de 12.5 mm de espesor aplicando tres pasadas de soldadura para la junta AED y solamente una pasada en la junta AEI. La caracterización microestructural por medio de microscopía óptica reveló signos de reacción entre el refuerzo y la matriz para la junta soldada por AED, mientras que para la soldadura por AEI las partículas de SiC conservaron su morfología angular inicial. Esta diferencia microestructural se atribuye al mayor calor aportado durante la soldadura de la junta por AED. Las juntas soldadas se ensayaron mecánicamente a tensión y se encontró que la falla ocurrió consistente en el metal de la soldadura con resistencias a la ruptura de 209 y 234 MPa para AED y AEI, respectivamente. La mayor resistencia mecánica medida para la soldadura por AEI fue debido a la menor porosidad y a la mayor incorporación y dispersión de partículas de SiC en el metal de la soldadura.

Palabras clave:

Materiales Compuestos de Matriz Metálica, Soldadura, Arco eléctrico indirecto.

Abstract

Using the process Gas Metal Arc Welding (GMAW) was realized the weld of a composite with aluminium matrix, A-359, reinforced by 20 % (in volume) of SiC's particles. Due to the high reactivity between the liquid aluminium and the SiC, which represents a difficulty in the weld for merger of these materials, carried out a comparison between the use of the electrical direct and indirect arch (AED and AEI respectively), which implies different designs of joint. The design for AED is a joint in simply V, whereas for AEI the joint is in square edges and a thin bar of contribution material in his top part where the electrical arch is applied. The welds were made on plates of 12.5 mm thick using three weld passes for AED board and only one pass in the AEI joint. The microstructural characterization by optical microscopy revealed signs of reaction between the reinforcement and the matrix for AED welded joint, while for welding AEI SiC particles retained their initial angular morphology. This microstructural difference is attributed to the higher heat input during welding of the joint by AED. Welded joints were mechanically tested in tension and found consistent the fault occurred in the weld metal with resistance at break of 209 and 234 MPa for EDA and AEI, respectively. The highest mechanical resistance to welding AEI was due to lower porosity and greater incorporation and dispersion of SiC in the weld metal.

Índice General

Contenido:	Página
Resumen	II
Abstract	III
Índice General	IV
Índice de Figuras	VI
Índice de Tablas	VIII
Nomenclatura	IX
Objetivo	X
Definición del Problema	XI
Hipótesis	XII
Capítulo 1 Introducción	1
Capítulo 2 Revisión de la literatura	3
2.1 Materiales compuestos	3
2.1.1 Clasificación de los materiales compuestos.	4
2.1.1.1 Materiales compuestos reforzados con partículas.	5
2.1.1.2 Materiales compuestos reforzados con fibras.	6
2.1.1.3 Materiales compuestos laminares.	8
2.1.1.4 Materiales compuestos de matriz metálica. (MCMC)	9
2.1.1.5 Materiales compuestos de matriz cerámica. (MCMC)	10
2.1.1.6 Materiales compuestos de matriz polimérica. (MCMP)	11
2.1.2 Usos y aplicaciones de los materiales compuestos.	12
2.2 Descripción del proceso de soldadura GMAW (MIG/MAG).	13
2.2.1 Influencia de los distintos parámetros.	15
2.2.1.1 Polaridad.	15
2.2.1.2 Tensión del arco.	16
2.2.1.3 Velocidad de alimentación del hilo.	16
2.2.1.4 Naturaleza del gas.	16
2.2.1.5 Transferencia del metal.	17
2.2.1.6 Gases de protección.	20
2.3 El proceso de soldadura con arco eléctrico indirecto.	21
2.4 El material compuesto A359-20%SiC.	25
2.5 La estabilidad térmica del SiC en aluminio líquido.	25
2.6 Soldabilidad de los materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con SiC.	32

Capítulo 3. Procedimiento experimental.	36
3.1 Materiales.	36
3.2 Diseño de junta y variables operativas.	37
3.3 Caracterización microestructural.	39
3.4 Caracterización mecánica.	40
Capítulo 4. Resultados y discusión.	41
4.1 Geometría de las soldaduras.	41
4.2 Microestructura de las juntas soldadas.	44
4.3 Propiedades mecánicas y fractura.	53
Capítulo 5. Conclusiones.	58
Bibliografía.	60

Índice de figuras

Contenido:	Página
Figura 2.1. Clasificación de los materiales compuestos según su reforzamiento: a) partículas, b) fibras, c) laminados.	5
Figura 2.2. Reforzamiento de un material compuesto con partículas a) no interconectadas b) interconectadas.	7
Figura 2.3. Materiales compuestos reforzados con fibras. a) unidireccionales. b) bidireccionales. c) multidireccionales. d) aleatorios.	8
Figura 2.4. Algunas aplicaciones de los materiales compuestos. a) Industria automotriz, b) industria aeronáutica, c) industria de la construcción, d) artículos deportivos, e) herramientas de corte, f) elementos industriales, como sellos mecánicos.	12
Figura 2.5 Isotermas del arco eléctrico, en donde se muestran las temperaturas desarrolladas entre la punta del electrodo y el material base.	13
Figura 2.6 Elementos que intervienen en el proceso de soldadura MIG	14
Figura 2.7 Influencia del Gas de protección en el cordón de soldadura.	17
Figura 2.8 Tipos de transferencia en el proceso de soldadura MIG.	17
Figura 2.9 Acomodo de material en la técnica de arco eléctrico indirecto.	21
Figura 2.10 Transferencia de energía en la aplicación del arco eléctrico de forma convencional.	22
Figura 2.11 Transferencia de energía con la aplicación del arco eléctrico indirecto.	22
Figura 2.12 Isométrico en donde se representa la aplicación del arco eléctrico indirecto.	23
Figura 2.13 Punto en donde se realiza el arco eléctrico cuando se aplica el arco indirecto.	24
Figura 2.14 Comparación entre cuantificación experimental (símbolos) y por modelo (línea fantasma) de la relación molar, α , de SiC convertido a Al_4C_3 , para muestras de Al-SiC tratadas térmicamente en función del tiempo a dos temperaturas; a) 800 y b) 900°C.	28
Figura 2.15 Cantidad de SiC convertido a Al_4C_3 en un material compuesto 6061/20%vol.SiC después de 1 hora de permanencia a diferentes temperaturas.	30
Figura 2.16. Variaciones en los contenidos de Si en equilibrio en el sistema Al/SiC en función de la temperatura.	30
Figura 2.17 Proyección <i>liquidus</i> en la esquina rica en Al del sistema Al-Si-C [4].	31

Figura 2.18 Secciones politérmicas del diagrama de fases Al-Si-C; a) Al-SiC, b) Al+3%peso Si-SiC, c) Al+7%peso Si-SiC y d) Al+12%peso Si-SiC.	32
Figura 2.19 Perfiles transversales; a) cordón de soldadura depositado por el proceso TIG en un material 6061/15%SiC en su condición como se recibió y b) soldadura de un material 6061/18%SiC el cual fue desgasificado previo al procesos de soldadura.	33
Figura 2.20 Microestructura en la zona de fusión a) de la soldadura por el proceso TIG de un material compuesto 6061/40%SiC [46] y b) de la soldadura por el proceso laser de un material compuesto 2024/15%SiC [47].	33
Figura 3.1 Diseño de las juntas y sus dimensiones (mm) cuando el arco es aplicado a) directamente y b) indirectamente.	38
Figura 4.1 Perfiles de los cordones de soldadura depositados por; a) AED a temperatura ambiente y b) AEI a 100°C.	42
Figura 4.2 Áreas de la sección transversal de las juntas soldadas para el cálculo del porcentaje de dilución. A = material base fundido, B = ranura y C = refuerzo de la soldadura.	42
Figura 4.3 Características microestructurales del material compuesto A-359/20%SiC _p . a) y b) micrografías ópticas, c) y d) micrografías por electrones retrodispersados y e) y f) micrografías por electrones secundarios.	45
Figura 4.4 Microestructura en la parte inferior de la soldadura obtenida por AEI.	47
Figura 4.5 Microestructura típica de la interfase metal de la soldadura/material compuesto base de la junta soldada por AEI.	47
Figura 4.6 Detalles de las características microestructurales de la soldadura obtenida por AEI en; a) la ZPF y b) en el centro del metal de la soldadura.	48
Figura 4.7 Espectros de difracción de rayos X de las juntas soldadas obtenidas por AEI y AED.	50
Figura 4.8 Microestructura en la interfase metal de la soldadura/material base de la junta soldadura obtenida por AED a baja y alta magnificación.	51
Figura 4.9 Detalles microestructurales de la soldadura por AED en, a) la pasada de raíz y b) la parte superior del metal de la soldadura.	51
Figura 4.10 Perfiles transversales de microdureza Vickers de las juntas soldadas con la aplicación de; a) 50 y b) 500 g de carga.	54
Figura 4.11 Fractografías de las muestras ensayadas a tensión; a y b) AED, c y d) AEI.	56
Figura 4.12 Detalles de la fractura en la soldadura obtenida por AEI.	56

Índice de tablas

Contenido:	Página
Tabla 2.1 Comparación entre las propiedades de la aleación de un aluminio convencional y un material compuesto que contiene esa aleación de aluminio en su matriz.	4
Tabla 3.1 Composición química de los materiales metálicos empleados (% en peso).	37
Tabla 3.2 Parámetros de soldadura utilizados para soldar los materiales compuestos usando AED y AEI.	39

Nomenclatura

AED	Arco eléctrico Directo.
AEI	Arco eléctrico Indirecto.
MCM	Materiales Compuestos de Matriz Metálica
MMC's	Compuestos de Matriz Metálica (<i>Metal Matrix Composites</i>)
CMC's	Compuestos de Matriz Cerámica (<i>Ceramic Matrix Composites</i>)
PMC's	Compuestos de Matriz Polimérica (<i>Polimeric Matrix Composites</i>)
GMAW	soldadura con protección de gas y electrodo metálico consumible (<i>Gas Metal Arc Welding</i>)
MIG	Soldadura por arco con gas inerte (<i>Metal Inert Gas</i>)
MAG	Soldadura por arco con gas Activo (<i>Metal Active Gas</i>)
TIG	Soldadura de arco con electrodo de tungsteno y protección de gas (<i>Tungsten Inert Gas</i>)
A	Amperes.
V	Volts
mm s ⁻¹ , mm/s	milímetros por segundo
L min ⁻¹ , L/m	litros por minuto
°C	Grados Celsius.
°K	Grados Kelvin
kJ mm ⁻¹ , kJ/mm	kilo Joule por milímetro.
mm	milímetros.
kJ/s	kilo Joule por segundo
MCB	Material compuesto base
ZPF	Zona parcialmente fundida
µm	micrómetro, micrón.
g	gramos
MPa	Mega Pascal

Objetivo

Soldar con arco eléctrico el material compuesto de matriz metálica A-356/20%SiC_p (12.5 mm de espesor) de una sola pasada de soldadura sin que ocurra la degradación de las partículas de SiC y que la resistencia a la tensión de la junta soldada sea aceptable.

Definición del problema

Debido a sus propiedades, disponibilidad y costo, el SiC ha sido ampliamente usado para reforzar al aluminio y sus aleaciones. No obstante, se ha encontrado que es térmicamente inestable en el aluminio líquido a las temperaturas de procesamiento, por lo que se descompone y forma un compuesto indeseable por ser higroscópico, Al_4C_3 , y silicio libre [1-4].

La soldabilidad por fusión de los compuestos Al-Si/SiC es muy problemática debido a la reactividad exacerbada por las altas temperaturas que se alcanzan durante el ciclo térmico de soldadura por arco eléctrico, además de la formación indeseable de Al_4C_3 en el metal de la soldadura, ya que es higroscópico y genera defectos en la soldadura, independientemente de los procesos de soldadura por fusión empleados (laser, haz de electrones, TIG o MIG) [5-8].

Hipótesis

El uso del arco eléctrico indirecto permitirá unir en una sola pasada de soldadura el material compuesto de matriz metálica A359/20%-SiCp y durante el proceso de soldadura se aportará menos calor al material base al soldar, por lo que se minimizará la degradación que puedan sufrir las partículas de SiC por las altas temperaturas desarrolladas durante el ciclo térmico de soldadura y se obtendrá una junta soldada con resistencia mecánica aceptable.

Capítulo 1

Introducción

Las propiedades mecánicas de los materiales monolíticos tales como el aluminio y sus aleaciones pueden incrementarse considerablemente mediante la incorporación de una fase cerámica dura y rígida como refuerzo, dando lugar a un material compuesto de matriz metálica (MCMM). La investigación extensa y ardua ha conducido al desarrollo de procesos simples para la incorporación de cerámicos en matrices metálicas que son escalables a grandes volúmenes de producción con costos razonables. La mayoría de estos métodos involucran metal fundido. En la actualidad, la tecnología para fabricar MCMM es madura y representa una industria bien establecida, de tal manera que los MCMM se usan en una amplia gama de aplicaciones comerciales [9]. Sin embargo, una expansión todavía mayor en el uso y explotación de los beneficios de mezclar metales y cerámicos se ha visto limitada debido a los problemas que surgen en el procesamiento secundario de esta clase de materiales. La presencia de una segunda fase con propiedades muy diferentes a la matriz, trae complicaciones adicionales a estos procesos. Por ejemplo, en los procesos de soldadura por fusión con arco eléctrico se produce una pileta líquida de soldadura que tiene poca fluidez y puede solidificar con una gran cantidad de porosidad dependiendo de la ruta de procesamiento del material compuesto. Por otro lado, la estabilidad térmica de la fase de refuerzo puede ser otra preocupación en el rendimiento de estos materiales [5].

Debido a sus propiedades, disponibilidad y costo, el SiC ha sido ampliamente usado para reforzar al aluminio y sus aleaciones. No obstante, se ha encontrado que es

térmicamente inestable en el aluminio líquido a las temperaturas de procesamiento, por lo que se descompone en un compuesto indeseable por ser higroscópico, Al_4C_3 , y silicio libre. Para evitar este problema, se adicionan al baño fundido de aluminio altos contenidos de silicio [1-4].

En el mismo contexto, la soldabilidad por fusión de los compuestos Al-Si/SiC es muy problemática debido a la reactividad acrecentada por las altas temperaturas que se alcanzan durante el ciclo térmico de soldadura por arco eléctrico. En la literatura abierta se ha reportado de manera repetitiva la formación de Al_4C_3 en el metal de la soldadura en materiales compuestos base aluminio cuando son reforzados por SiC, independientemente de los procesos de soldadura por fusión empleados (laser, haz de electrones, TIG o MIG) [5-8]. El éxito en evitar la formación de Al_4C_3 ha sido únicamente parcial, aún cuando la matriz es una aleación con silicio, reduciendo el calor aportado y empleando un ciclo térmico rápido con un laser [6, 7].

Estudios previos [10, 11], demostraron que el uso del proceso de soldadura con protección gaseosa y electrodo metálico consumible (GMAW, por sus siglas en inglés) con la aplicación indirecta del arco eléctrico es una técnica adecuada para soldar tanto aleaciones de aluminio como materiales compuestos base aluminio y sus aleaciones con bajos y altos contenidos de refuerzo. El presente estudio tiene como objetivo valorar la posibilidad de producir soldaduras sanas de un material compuesto comercial, A-359/20%SiCp, mediante el uso de este nuevo método desarrollado en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas hace algunos años.

Capítulo 2

Revisión de la literatura

2.1 Los materiales compuestos.

Una clasificación muy general que se puede realizar de los materiales en ingeniería es: metales, cerámicos, polímeros y compuestos. Estos últimos, es un sistema de materiales compuestos por dos o más fases distintas físicamente, cuya combinación produce propiedades agregadas diferentes de las de sus componentes. En cierta manera, los compuestos son los materiales más interesantes en la ingeniería, debido a que su estructura es más compleja que los demás tipos [12].

Los materiales compuestos o compósitos poseen combinaciones especialmente útiles de sus propiedades (ligereza, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, tenacidad, conductividad, etc.), suelen ser productos de mezclas de dos o más componentes muy distintos entre sí. Los materiales compuestos se originan de una combinación macroscópica de dos o más materiales distintos que tienen una interfase bien definida entre ellos [13]. En los materiales compuestos existe claramente una fase identificable llamada refuerzo, la cual está envuelta en otra fase denominada matriz, además, se puede identificar una interfase entre el refuerzo y la matriz [14].

Uno de los materiales utilizados en un material compuesto puede ser ligero y fuerte, pero demasiado frágil para usarse solo, el otro puede ser tenaz y dúctil, pero con deficiencia en su resistencia mecánica, cuando se combinan en forma adecuada dos de estos materiales, se forma un compósito dotado de excelentes cualidades [13].

En un material compuesto sus propiedades son superiores comparativamente hablando que las de los materiales de la matriz que los forman, algunas propiedades típicas importantes de los materiales que forman el material compuesto A359/SiC/20p T6, son comparadas con la aleación de aluminio convencional y se muestran en la tabla 2.1 [15, 16].

Tabla 2.1 Comparación entre las propiedades de la aleación de un aluminio convencional y un material compuesto que contiene esa aleación de aluminio en su matriz [15,16].

Material	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la abrasión (volumen perdido en mm ³)	Resistencia al desgaste (volumen perdido en mm ³)
A359 T6	228	0.575	0.180
A359/SiC/20p T6	340	0.202	0.023

2.1.1 Clasificación de los materiales compuestos

Los materiales compuestos, entre muchas otras formas, se pueden clasificar de acuerdo a dos criterios:

- A) Según el tipo de refuerzo en: reforzado con partículas, reforzado con fibras y laminados. La figura 2.1 esquematiza esta clasificación.
- B) Según la matriz en: matriz metálica, matriz cerámica, matriz polimérica [17].

En general, si en los materiales compuestos reforzados con partículas, estas son uniformemente distribuidas, el material tendrá un comportamiento isotrópico, los materiales compuestos reforzados con fibras pueden ser tanto isotrópicos como anisotrópicos, y los laminados siempre presentaran propiedades anisotrópicas [13].

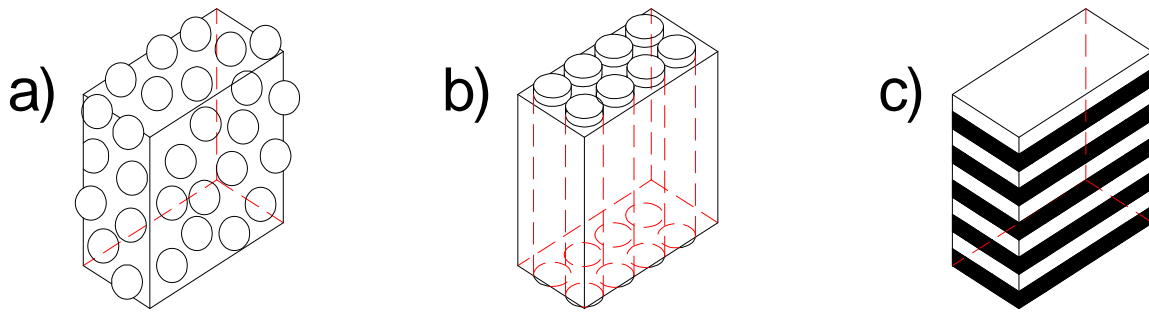


Figura 2.1 Clasificación de los materiales compuestos según su reforzamiento:
a) partículas, b) fibras, c) laminados.

Los materiales compuestos pueden ser metal-metal, metal-cerámico, metal-polímero, cerámico-polímero, cerámico-cerámico o polímero-polímero. Las propiedades de estos compuestos están determinadas por varios factores, tales como las propiedades de los materiales utilizados como matriz y refuerzo, la morfología y distribución de la fase reforzante y la interacción entre ambas fases. Dependiendo de los materiales, estas propiedades pueden incluir alto esfuerzo específico, rigidez específica, maquinabilidad, resistencia al desgaste, bajo coeficiente de expansión térmica, propiedades de amortiguamiento, resistencia mecánica, buen comportamiento a elevadas temperaturas, resistencia al impacto, resistencia a la corrosión, entre otras [18].

2.1.1.1 Materiales compuestos reforzados con partículas.

El reforzamiento de un material compuesto es considerado como una partícula, si todas sus dimensiones, (ejes de la partícula) son aproximadamente iguales [14].

Los materiales compuestos reforzados con partículas, pueden ser endurecidos por dispersión, lo cual bloquea el movimiento de las dislocaciones lo que genera un pronunciado endurecimiento del material, los materiales compuestos que contienen

grandes cantidades de partículas gruesas, estas no bloquean el deslizamiento con eficacia, estos materiales están diseñados para producir combinaciones de propiedades poco usuales, y no para mejorar la resistencia [17].

Los refuerzos de partículas en materiales compuestos se aplican generalmente a matrices metálicas, ya que tienen un menor costo, y permiten obtener productos con propiedades isotrópicas. Los refuerzos típicos en forma de partícula son: los carburos, como el SiC, TiC o el B₄C, los óxidos, SiO₂, TiO₂, ZrO₂, MgO, la mica y el nitruro de silicio, Si₃N₄ [19]. Las partículas pueden ser interconectadas o no interconectadas, según como se muestra en la figura 2.2.

Un material compuesto con partículas no interconectadas se puede logra fabricar compactando los polvos del material de refuerzo, lo cual genera una preforma, después de esto se procede a infiltrar o llenar los huecos existentes entre los polvos con el material de la matriz, cuando se utilizan partículas interconectadas, una vez compactado, se sinteriza, esto es que se lleva a altas temperaturas con el fin de lograr la difusión de átomos entre partículas, esto genera la disminución de los espacios entre las partículas y la interconexión entre ellas. En general, al sinterizar una preforma se incrementa su densidad en función de la temperatura y el tiempo de sinterizado [20].

2.1.1.2 Materiales compuestos reforzados con fibras.

En la manufactura de los materiales compuestos reforzados con fibras se usan fibras unidireccionales, bidireccionales, multidireccionales y aleatorias, según se muestra en la figura 2.3. La mayor parte de los materiales compuestos reforzados con fibras consiguen una mayor resistencia a la fatiga, mejor rigidez y una mejor relación

resistencia-peso, al incorporar fibras resistentes y rígidas aunque frágiles en una matriz más dúctil [17].

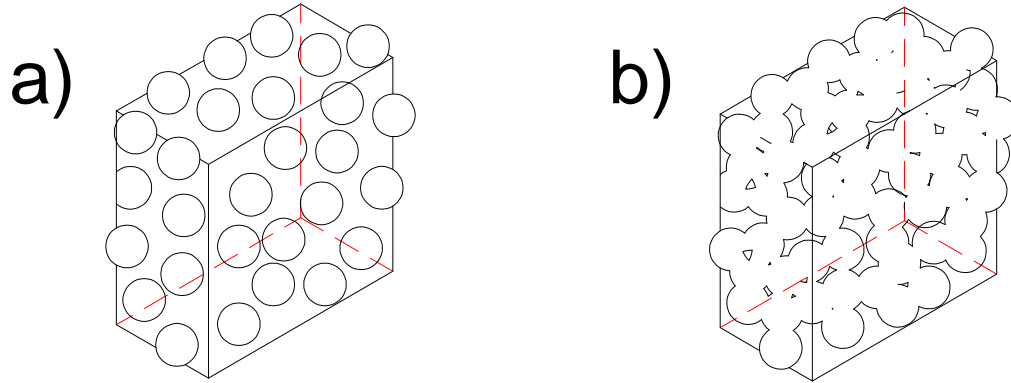


Figura 2.2 Reforzamiento de un material compuesto con partículas
a) no interconectadas b) interconectadas.

Existen muchos materiales que son empleados como refuerzos, tales como materiales orgánicos como paja o fibras de coco en la fabricación de adobes, varillas de acero en estructuras con matriz de concreto, fibras de vidrio en matriz polimérica, fibras de boro, carbono, polímeros y materiales cerámicos.

Los materiales compuestos reforzados con fibras metálicas continuas son poco empleados debido a la problemática que ofrecen este tipo de reforzamiento, ya que la matriz puede ocasionar un ataque químico al refuerzo, los posibles cambios estructurales de las fibras, la posible disolución de las fibras con la matriz, y la oxidación. En contraparte, se han utilizado fibras continuas de materiales cerámicos como refuerzo, tales como B, Al_2O_3 , SiC, las cuales no se disuelven en la matriz, mantienen su resistencia a altas temperaturas, tienen alto módulo de elasticidad, no se oxidan y tienen baja densidad [19].

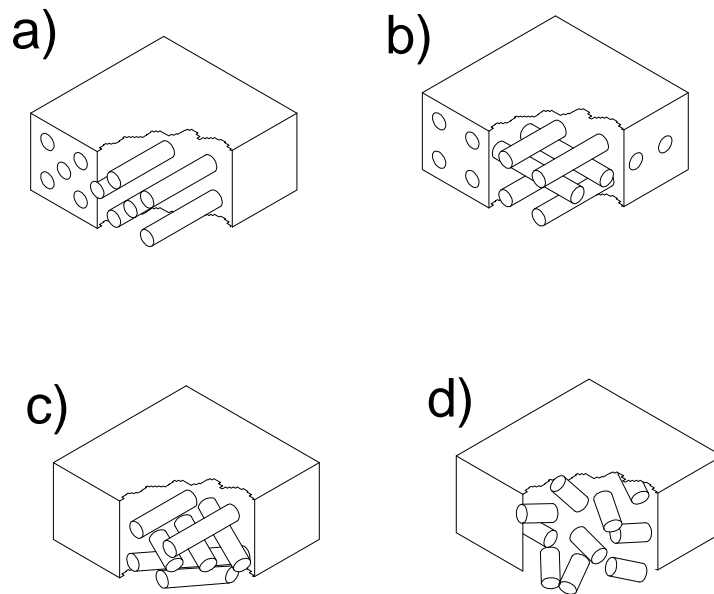


Figura 2.3 Materiales compuestos reforzados con fibras. a) unidireccionales. b) bidireccionales. c) multidireccionales. d) aleatorios.

Los materiales compuestos reforzados con fibras discontinuas o *whiskers* producen materiales con propiedades inferiores a los fabricados con fibras continuas, por lo tanto son más económicos, generalmente se aplican con matrices metálicas. Los principales refuerzos que se encuentran en el mercado son SiC y Si₃N₄.

2.1.1.3 Materiales compuestos laminares.

Los materiales compuestos laminares generalmente son capas unidas por un adhesivo orgánico, un compuesto muy conocido de este tipo es la madera contrachapada o triplay. Los compuestos laminares incluyen recubrimientos muy delgados, superficies protectoras más gruesas, revestimientos, elementos bimetálicos, laminados y muchas otras.

Muchos materiales compuestos laminares son diseñados para mejorar la resistencia a la corrosión, mientras se mantiene un bajo costo, alta resistencia o bajo peso. Otras aplicaciones importantes incluyen una mayor resistencia al desgaste o abrasión. Una mejor apariencia y características poco usuales de expansión térmica. Para producir estos materiales se pueden utilizar una gran cantidad de procesos de manufactura secundarios como son el laminado, extrusión, compresión, soldadura, etc. [13].

Un ejemplo de la utilización de este tipo de materiales compuestos es en los vidrios de seguridad que se encuentran en los automóviles, los cuales están formados por dos capas de vidrio unidos por un adhesivo plástico, esto impedirá que al romperse el vidrio se desprendan los fragmentos de vidrio del adhesivo, en las placas de circuitos impresos en donde se coloca una capa de polímero (baquelita) junto con una de cobre, o para cubiertas decorativas de muebles, donde se coloca una capa de madera de aglomerado junto con una de formaica o melamina [17].

Algunos materiales compuestos laminados son llamados tipo emparedado o sándwich, los cuales tienen capas delgadas de material expuesto unidas con un material ligero de relleno, como la espuma plástica. Ni el relleno ni el material expuesto son fuertes o rígidos, pero el material compuesto posee ambas propiedades. Algunos ejemplos es el cartón corrugado o la estructura de panal utilizada en las aeronaves [13].

2.1.1.4 Materiales compuestos de matriz metálica (MCMM).

Los materiales compuestos de matriz metálica surgieron con la necesidad de contar con materiales que fueran capaces de soportar temperaturas de trabajo más altas a las que presentan los materiales de matriz polimérica, los MCMM son combinaciones

ingenieriles de dos o más materiales en los cuales se alcanzan mejores propiedades y consisten en una dispersión de partículas reforzadas en un metal.

Los MCMM son reforzados principalmente con fibras o partículas, metálicas o cerámicas. Los refuerzos poliméricos, debidos a sus bajos puntos de fusión o degradación, no es común utilizarlos como refuerzos en matrices metálicas, aunque se han logrado producir por extrusión en caliente, utilizando polvos de aluminio y fibras poliméricas de altas temperaturas de fusión. Generalmente se utiliza aluminio como matriz, pero existen aplicaciones en las cuales se ha utilizado cobre, magnesio, zinc, plomo, hierro, níquel, aleaciones base níquel y muchos otros metales.

Como materiales reforzantes, en general se han utilizado fibras o partículas que pueden ser de boro, grafito, alúmina, carburo de silicio, carburo de titanio, acero, tungsteno, titanio y molibdeno, entre otros [18].

2.1.1.5 Materiales compuestos de matriz cerámica (MCMC).

Tradicionalmente se han utilizado materiales compuestos de matriz cerámica desde hace mucho tiempo en la construcción, tal es el caso de sistemas cerámico/orgánico, en la elaboración de adobes, que consisten de fibras de paja en una matriz de arcilla y arena, cerámico/cerámico, en la elaboración de concreto u hormigón, que consiste en partículas de arena o grava en una matriz de cemento, y sistemas cerámico/metálico, en la elaboración de concreto armado, que consiste en refuerzos de fibras continuas de acero en una matriz de concreto.

Los MCMC reforzados con fibras o partículas metálicas son poco usados debido a las desventajas que presenta el uso de este refuerzo, estas son la fácil oxidación y la

alta densidad del refuerzo, al emplearse refuerzos metálicos en matrices cerámicas, lo que se obtiene es un incremento a la resistencia al choque térmico, esto es, que disminuye la falla del material cerámico por los cambios bruscos de temperatura.

Los MCMC han tenido aplicación importante en el ramo aeroespacial, principalmente los sistemas carbono/carbono, carbono/SiC y SiC/SiC, ya que proveen una alta resistencia a elevadas temperaturas, las cuales van de 1000 a 2200°C [21].

Otras aplicaciones de los MCMC es en la industria automotriz, en donde se han utilizado en los discos de frenos de automóviles de alta velocidad [17], así como se han aplicado MCMC en herramientas de corte de metales, con fibras de SiC en una matriz de Al₂O₃, o en ambientes que son corrosivos para otros materiales [19].

2.1.1.6 Materiales compuestos de matriz polimérica (MCMP).

En los últimos años han sido utilizados una gran cantidad de MCMP, gracias a la abundancia y al bajo costo de los polímeros, los cuales se refuerzan generalmente con partículas cerámicas, como el vidrio, la aramida o el carbono que se insertan en una matriz plástica.

Normalmente la matriz polimérica puede existir en dos tipos: en polímeros termoplásticos, que son polímeros que tienen una alta solubilidad y que tienden a deformarse con el incremento de la temperatura, y en polímeros termoestables, que son polímeros insolubles, tienen una alta rigidez y tienden a degradarse con el incremento de la temperatura.

Los MCMP tienen aplicaciones importantes en la construcción de embarcaciones [22] así como se han producido perfiles estructurales para construcción con MCMP

reforzados con fibras, obteniendo materiales con una resistencia mecánica casi igual a la del acero, son inoxidables, con una menor densidad, pero con una deformación elástica elevada [23].

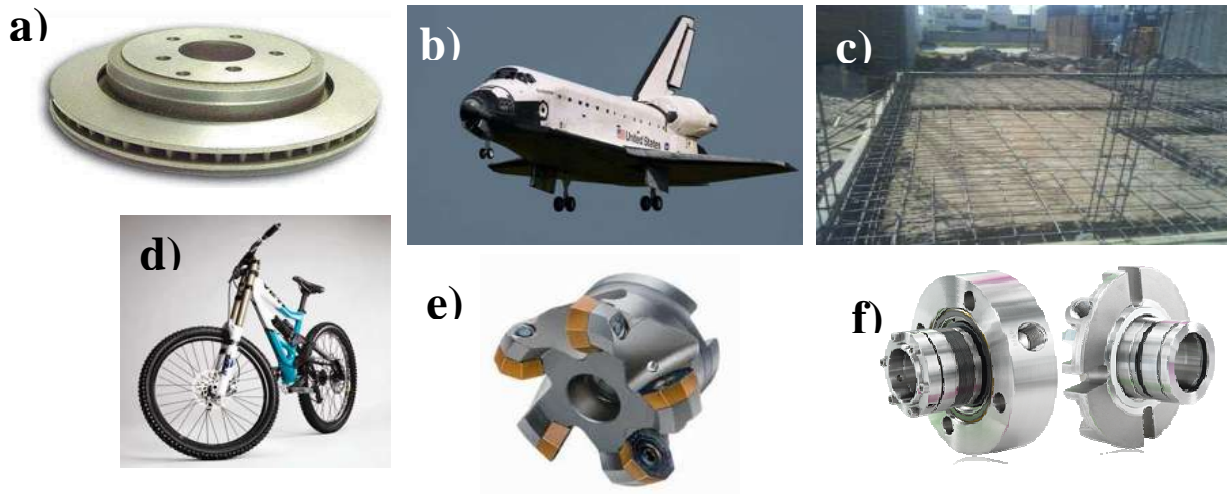


Figura 2.4 Algunas aplicaciones de los materiales compuestos. a) industria automotriz, b) industria aeronáutica, c) industria de la construcción, d) artículos deportivos, e) herramientas de corte, f) elementos industriales, como sellos mecánicos.

2.1.2 Usos y aplicaciones de los materiales compuestos.

Los materiales compuestos de matriz metálica, son destinados en forma general a aplicaciones estructurales en la industria automotriz, aeroespacial, militar, eléctrica y electrónica, las cuales exigen alta resistencia, rigidez y módulo específico. Para el caso de aplicaciones eléctricas o electrónicas, se ha logrado aprovechar al máximo la transferencia del calor que ofrecen a cambio de una mínima distorsión térmica [19,24], en general, los materiales compuestos se aplican eficazmente en la industria aeronáutica, en la industria automotriz, en la fabricación de embarcaciones, en la fabricación de artículos deportivos, herramientas y accesorios industriales, como sellos mecánicos [25].

Los materiales compuestos también son aplicados en la industria de la construcción, concretos, asfaltos, pavimentos, o elementos y perfiles estructurales. Algunas de las aplicaciones de los materiales compuestos se representan en la Figura 2.4.

2.2 Descripción del proceso de soldadura GMAW (MIG/MAG).

La soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible es un proceso en el que el arco se establece entre un electrodo de hilo continuo y la pieza a soldar, estando protegido de la atmósfera circundante por un gas inerte (proceso MIG) o por un gas activo (proceso MAG). El arco eléctrico formado entre el extremo del electrodo de alimentación continua y el material a soldar, se mantiene estable por la formación de un gas plasma, a través del cual se transporta el material de aporte y se generan elevadas temperaturas del arco eléctrico [26]. Según como se muestra en la figura 2.5.

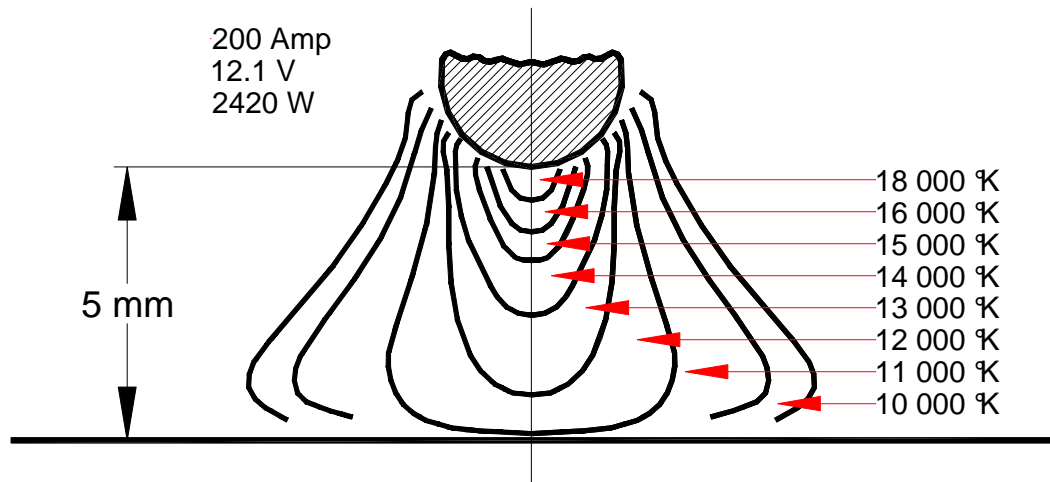


Figura 2.5 Isotermas del arco eléctrico, en donde se muestran las temperaturas desarrolladas entre la punta del electrodo y el material base [26].

En varios estudios se ha encontrado que las temperaturas calculadas y registradas en el extremo del electrodo, al momento del desprendimiento de las gotas del material de aporte en el proceso de soldadura MIG, con transferencia por rocío son similares a los 2200°C, tanto para el aluminio y sus aleaciones como para los electrodos de acero al carbono [26-28].

En la figura 2.6 se indican los elementos más importantes que intervienen en el proceso y este puede ser:

SEMIAUTOMÁTICO: La tensión de arco, la velocidad de alimentación del hilo, la intensidad de soldadura y el caudal de gas se regulan previamente. El avance de la antorcha de soldadura se realiza manualmente.

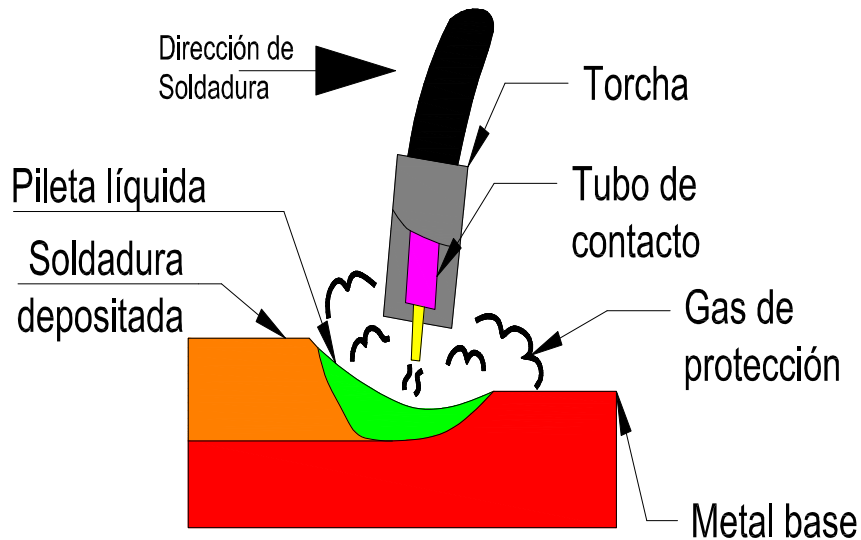


Figura 2.6 Elementos que intervienen en el proceso de soldadura MIG [19].

AUTOMÁTICO: Todos los parámetros, incluso la velocidad de soldadura, se regulan previamente, y su aplicación en el proceso es de forma automática.

ROBOTIZADO: Todos los parámetros de soldeo, así como las coordenadas de localización de la junta a soldar, se programan mediante una unidad específica para este fin. La soldadura la efectúa un robot al ejecutar esta programación.

Este tipo de soldadura se utiliza principalmente para soldar aceros de bajo y medio contenido de carbono, así como para soldar acero inoxidable, aluminio y otros metales no ferrosos. Produce soldaduras de gran calidad en artículos para la industria del automóvil, generadores de vapor y recipientes a presión o estructura metálica en general, construcción de buques y un gran número de otras aplicaciones, día a día en aumento.

2.2.1 Influencia de los distintos parámetros.

El comportamiento del arco, la forma de transferencia del metal a través de éste, la penetración y la forma del cordón, están condicionados por la conjunción de una serie de parámetros entre los que destacan:

2.2.1.1 Polaridad.

Afecta a la forma de transferencia, penetración y velocidad de fusión del hilo. Normalmente se trabaja con polaridad inversa o positiva, es decir, la pieza al negativo y el alambre de soldadura al positivo. En este punto, es interesante comentar el hecho de que ya que los electrones viajan del polo negativo al positivo, es este último el que se calienta más, concretamente el polo positivo se calienta un 65% más que el negativo. Esta condición podría ser particularmente útil para aquellos trabajos donde se requiera

un mayor aporte térmico en la pieza que en el hilo de soldadura, lo que se conseguiría empleando la polaridad directa o negativa.

Del mismo modo, y debido a la circulación de electrones del polo negativo al positivo, se origina una propiedad especialmente importante: el arco muestra afinidad por dispersar las películas de óxido y otros materiales refractarios en el polo negativo. Así, pues, en todos aquellos casos de soldadura de metales que forman óxidos refractarios, se hace imprescindible la conexión de la polaridad inversa o positiva (negativo en la pieza), con la finalidad de aprovechar precisamente la acción limpiadora del arco.

2.2.1.2 Tensión del arco.

Este parámetro resulta determinante en la forma de transferencia del metal a la pieza, tal como se muestra en el punto 2.2.1.5.

2.2.1.3 Velocidad de alimentación del hilo.

En esta técnica no se regula previamente la intensidad de corriente en la soldadura, sino que es el ajuste de la velocidad de alimentación del hilo el que provoca la variación de la intensidad gracias al fenómeno de la autorregulación.

2.2.1.4 Naturaleza del gas.

Presenta una notable influencia sobre la forma de transferencia del metal, penetración, aspecto del cordón, proyecciones. En la figura 2.7 se muestran las formas de los cordones y las penetraciones típicas de este proceso, en función del tipo de gas:

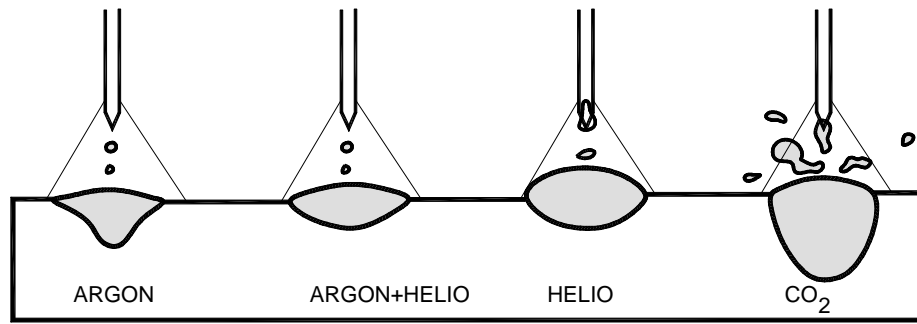


Figura 2.7 Influencia del gas de protección en el cordón de soldadura [29].

2.2.1.5 Transferencia del metal.

Existen distintas formas de transferencia del metal en el arco, dependientes todas ellas de los valores de los parámetros de tensión e intensidad, en forma general se encuentran tres formas de transferencia, las cuales son por rocío o spray, globular y por corto circuito, según como se ilustra en la figura 2.8.

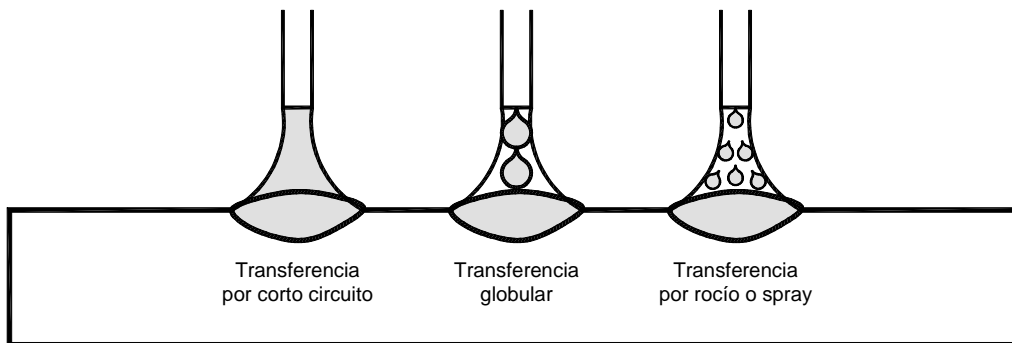


Figura 2.8.- Tipos de transferencia en el proceso de soldadura MIG.

a) Transferencia por corto circuito: En esta forma de transferencia, el hilo se funde formando una gota que se va alargando hasta el momento en que toca el metal de

base, y a causa de la tensión superficial se corta la unión con el hilo. En el momento de establecer contacto con el metal de base se produce un cortocircuito, aumenta en gran medida la intensidad y como consecuencia, las fuerzas axiales rompen el cuello de la gota y simultáneamente se reanuda el arco.

Para que un arco se comporte de esta forma, deben cumplirse una serie de condiciones:

- Utilización de polaridad inversa o positiva.
- Tensión y densidad de corriente bajas.
- Gas de protección CO₂ o mezclas de Ar/CO₂.

Con este tipo de arco se sueldan piezas de espesores reducidos, porque la energía aportada es pequeña en relación con otro tipo de transferencias. Es ideal para soldaduras en vertical, en cornisa y bajo techo, porque el baño de fusión es reducido y fácil de controlar.

b) Transferencia Globular: Cuando se opera con este tipo de arco, el hilo se va fundiendo por su extremo a través de gotas gruesas de un diámetro hasta tres veces mayor que el del electrodo. Al mismo tiempo, se observa como las gotas a punto de desprenderse van oscilando de un lado hacia otro. Como puede deducirse, la transferencia del metal es difícil, y, por tanto, el arco inestable, de poca penetración, y se producen numerosas proyecciones.

Se trata de un método que no se utiliza en la práctica, pero que puede aparecer cuando se efectúa el reglaje de un equipo de soldadura.

El arco suele comportarse de esta forma cuando hay valores grandes de tensión y bajos de intensidad, o también cuando se utiliza polaridad directa o negativa.

c) Transferencia por pulverización axial, spray o rocío: En este caso la transferencia se realiza en forma de gotas muy finas que se depositan sobre el metal base de forma ininterrumpida, similar a una pulverización por spray, de ahí que se conozca también este método por arco spray. Se caracteriza por un cono de proyección muy luminoso y por un zumbido característico.

Para que un arco se comporte de esta manera, es necesario que:

- Se utilice polaridad inversa o positiva.
- El gas de protección sea Ar o mezcla de Ar con algo de O₂ o de Ar con CO₂.
- Exista una tensión de arco relativamente elevada y una densidad de corriente también elevada.

El efecto de la utilización de la polaridad positiva se traduce en una enérgica acción limpiadora sobre el baño de fusión, que resulta particularmente útil en la soldadura de metales que producen óxidos pesados y difíciles de reducir, como el aluminio o el magnesio.

La penetración que se consigue es buena, por lo que se recomienda para soldar piezas de grueso espesor. Como inconveniente, cabe destacar que el baño de fusión resulta relativamente grande y fluido, por lo que no se controla con facilidad en posiciones difíciles.

d) Transferencia por arco pulsado: En este tipo de transferencia, se combina la superposición de dos corrientes, una ininterrumpida y de débil intensidad (llamada de base) cuyo objetivo es proporcionar al hilo la energía calorífica para mantener el arco encendido y otra constituida por una sucesión de pulsaciones a una determinada frecuencia. Cada pulsación eleva la intensidad a un valor suficiente que hace fundir una

gota del mismo diámetro que el diámetro del hilo que se está utilizando. Esta gota se desprende antes de que el extremo del hilo llegue a hacer contacto con el metal base, como consecuencia de las fuerzas internas que actúan. De esta manera se elimina en su totalidad las proyecciones, tan características de otros tipos de transferencia.

Además, se consigue una gran penetración debido a la elevada intensidad durante la pulsación, y sin embargo, la energía media empleada es inferior que utilizando MIG/MAG convencional, lo que repercute en una menor deformación de la pieza.

2.2.1.6 Gases de protección.

En la soldadura MIG (Metal Inert Gas), el gas que actúa como protección es inerte, es decir, que no actúa de manera activa en el propio proceso, y por tanto, muy estable. Por el contrario, en la soldadura MAG (Metal Active Gas), el gas de protección se comporta como un gas inerte a efectos de contaminación de la soldadura, pero, sin embargo, interviene termodinámicamente en ella. En efecto, en las zonas de alta temperatura del arco, el gas se descompone absorbiendo calor, y se recompone inmediatamente en la base del arco devolviendo esta energía en forma de calor.

De los seis gases inertes existentes (argón, helio, neón, criptón, xenón y radón) el argón y el helio son los gases más empleados. El argón se ioniza fácilmente, de manera que la tensión del arco bajo argón es sensiblemente inferior que bajo helio. El argón puro solo se utiliza en la soldadura del aluminio, el cobre, el níquel o el titanio. Si se aplica al acero, se producen mordeduras y cordones de contorno irregular. La soldadura con gas helio produce cordones más anchos y con una penetración menor que cuando se suelda con argón.

Existe otro tipo de mezcla de argón con cantidades inferiores al 5% de oxígeno que no modifica el carácter de inerte de la mezcla y que mejora la capacidad de "mojado", es decir, la penetración, ensanchando la parte inferior del cordón, y todo esto debido a que el oxígeno actúa sobre la tensión superficial de la gota [30].

2.3. El proceso de soldadura con arco eléctrico indirecto (AEI).

Se han reportados excelentes resultados en la unión de materiales compuestos, aplicando una modificación al proceso de soldadura MIG, esto se ha logrado colocando dos barras de metal de aporte sobre el metal base, y realizando el arco eléctrico entre estas dos barras [31], según el arreglo mostrado en la figura 2.9.

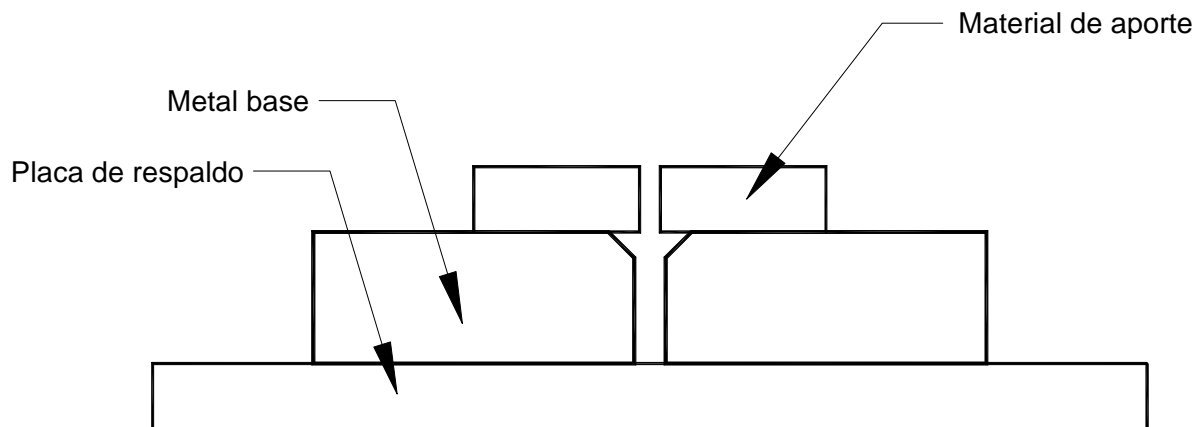


Figura 2.9 Acomodo de material en la técnica de arco eléctrico indirecto [26,32].

La estabilidad del arco eléctrico en procesos de soldadura de electrodos consumibles o no consumibles y el material base, producen elevadas temperaturas, las cuales van de los 10000 a los 18000°C, estas altas temperaturas producen que las gotas de aluminio se desprendan a 2200°C, al usar el proceso de soldadura MIG con transferencia por rocío.

No todo el calor que es desarrollado por el arco eléctrico es transmitido al metal base al ser soldado, existiendo pérdidas por radiación y en las salpicaduras, esto ocasiona que el arco eléctrico para la soldadura MIG tenga una eficiencia menor al 75% [31,32].

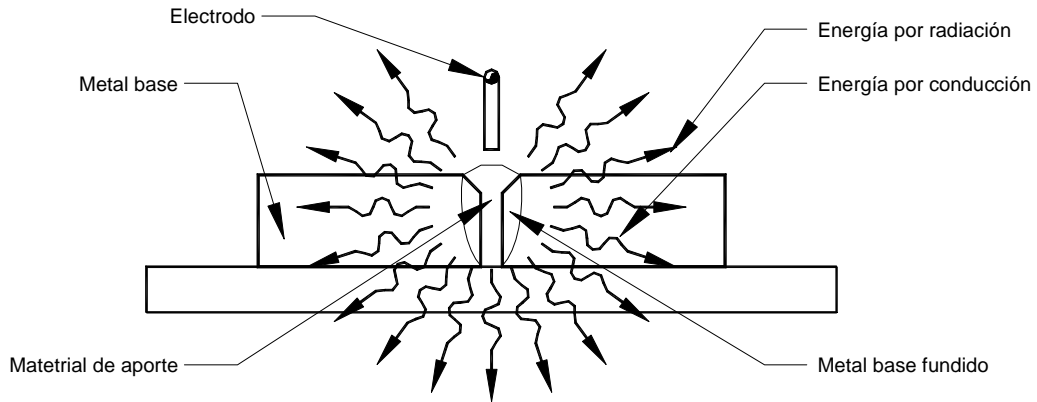


Figura 2.10 Transferencia de energía en la aplicación del arco eléctrico de forma convencional.

En la figura 2.10 se muestra la forma en la cual la energía es transferida durante la aplicación convencional de un arco eléctrico.

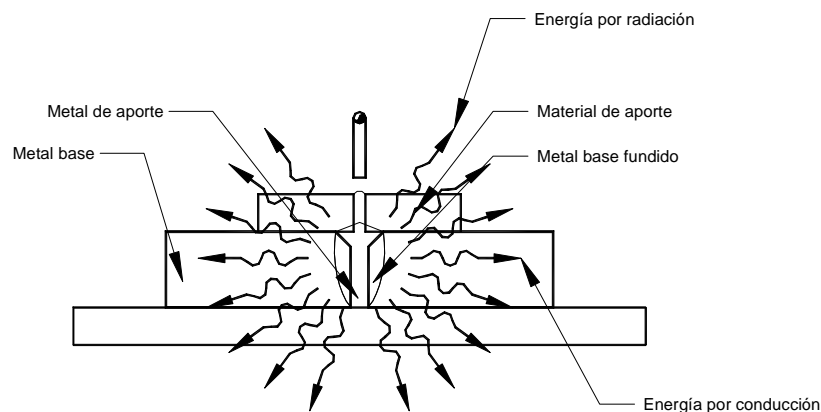


Figura 2.11 Transferencia de energía con la aplicación del arco eléctrico indirecto.

En la figura 2.11 se muestra la transferencia de calor una vez realizada la modificación al proceso por medio del arco eléctrico indirecto.

Al aplicar la técnica de arco eléctrico indirecto, se espera obtener mejores propiedades mecánicas en la unión soldada, esto debido a la disminución de defectos de solidificación en la soldadura y a la obtención de una mejor penetración.

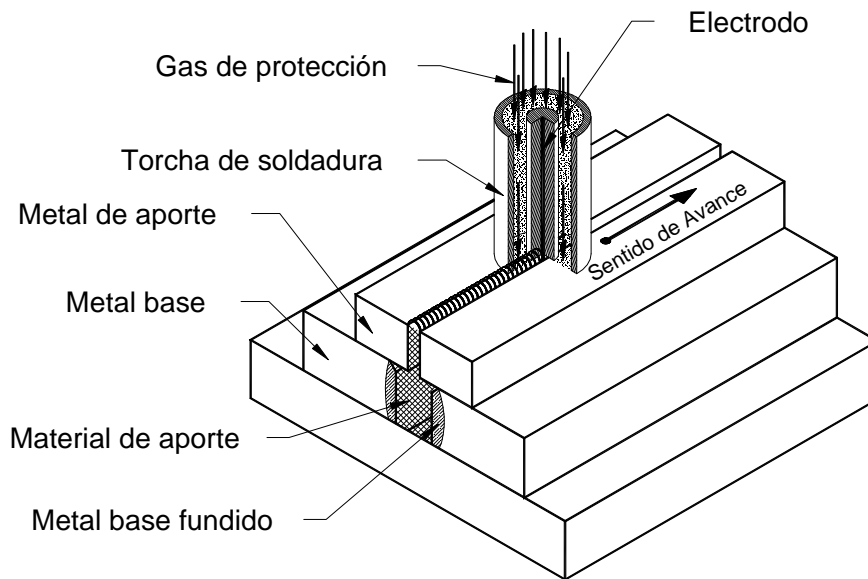


Figura 2.12 Isométrico en donde se representa la aplicación del arco eléctrico indirecto.

Esta técnica aprovecha mejor la energía desarrollada por el arco eléctrico, ya que este se establece entre el metal a soldar y una placa delgada que se coloca en la parte superior del material a soldar, con lo cual se elimina la pérdida de energía por radiación y convección, debido a la columna del arco eléctrico y al gas de protección, tal como ocurre cuando el arco eléctrico se establece en condiciones normales. En la figura 2.12 se muestra una perspectiva en isométrico de la técnica de unión por arco eléctrico indirecto. Se puede apreciar que el arco eléctrico se establece sobre el material a soldar y en el interior del material de aporte.

En la figura 2.13 se muestra una vista frontal del proceso en donde se puede apreciar el punto en donde se realiza el arco eléctrico.

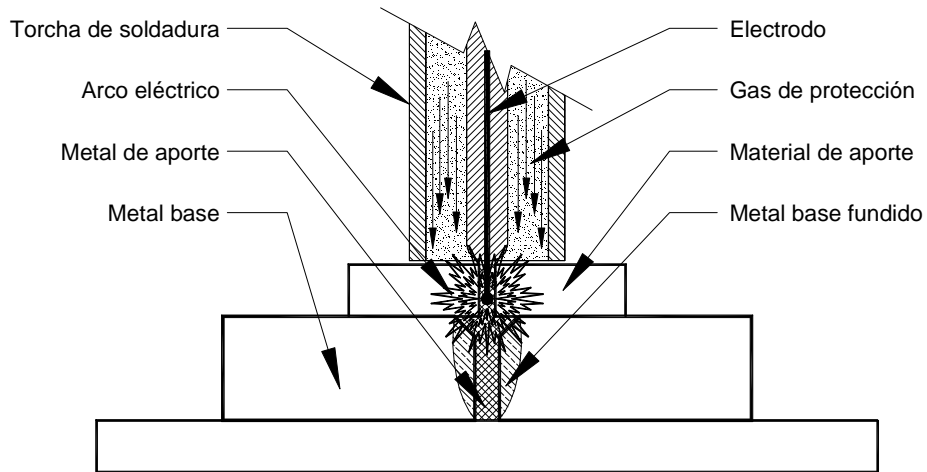


Figura 2.13 Punto en donde se realiza el arco eléctrico cuando se aplica el arco indirecto.

Esta técnica de unión funciona como un proceso de fundición y colada, con la única variante de que el metal en estado líquido que se produce a una temperatura de 2200°C se suministra inmediatamente dentro de la preparación de la unión a soldar, a medida de que la torcha de soldadura va cambiando de posición en función de la velocidad de desplazamiento. Evitando con esto las fuerzas de turbulencia generadas en la pileta líquida de soldadura y el contacto directo del metal base con las elevadas temperaturas generadas por el arco eléctrico. De esta forma, la fusión de las paredes en la preparación de la unión se efectúa por difusión líquida [26].

Utilizando esta técnica se han reportado excelentes resultados en la unión de aluminio 1010 [33], materiales compuestos de matriz metálica de TiC/Al (51%) y Al₂O₃/Al (20%) [34], aceros estructurales A-36 [35], aluminio 6061 [36, 37] entre otros.

2.4 El material compuesto A359-20%SiC_p.

El material considerado para este estudio es el A359-20%SiC_p, MCMM comercial fabricado por Duralcan. Este material contiene de un 8.5% a un 9.5% de Si en peso, el aluminio líquido no moja fácilmente las partículas de SiC, por lo que hay que considerarlo para evitar que las partículas de SiC se desplacen y así asegurar la incorporación de partículas en el líquido y una buena unión interfacial entre la matriz y el refuerzo.

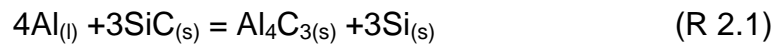
Además de esto, las altas temperaturas en el material pueden generar partículas indeseables como Al₄C₃. En 1987 Duralcan patentó la fundición con agitación, un método que satisface la producción de materiales compuestos de alta calidad. Se añaden partículas de SiC en una aleación de Al-Si, en donde, el Si ya contenido en el aluminio inhibe la formación de Al₄C₃, aparte de Duralcan, Cospray patentó el depósito por pulverización, una alternativa a la manufactura de MCMM. El proceso de producción de MCMM de Duralcan ofrece una distribución homogénea de partículas en una matriz del 95-98% de densidad de aluminio, así como la rápida solidificación inherente al proceso asegura una reacción mínima entre el material de refuerzo y la matriz [38].

2.5 La estabilidad térmica del SiC en aluminio líquido.

La manufactura de MCMM por la ruta líquida involucra fenómenos diferentes a los que ocurren cuando el material es producido por una ruta en estado sólido. Esto es debido a que el refuerzo y el metal líquido llegan a estar en contacto por tiempos

prolongados, razón por la cual la reactividad o estabilidad térmica del refuerzo en la matriz en estado líquido deben ser consideradas. Este aspecto, también tiene que ser tomado en cuenta en los procesos secundarios a los que se someta el material. Por ejemplo, las temperaturas que se pueden alcanzar en un proceso de soldadura por arco eléctrico, aunque muy localizadas, son más altas que las temperaturas de colada, ~740°C, en el caso particular del aluminio.

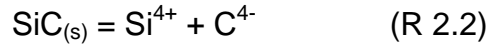
En diversos estudios [39, 40,1] se ha demostrado que el SiC reacciona con Al fundido, a presión atmosférica desde el punto de fusión del Al hasta 1400°C, para producir Al_4C_3 y Si de acuerdo a la reacción 2.1.



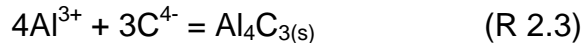
Esta reacción tiene varios efectos detrimentales; 1) como producto de reacción se produce Al_4C_3 en la interfase entre el refuerzo y la matriz, lo cual resulta en la degradación del refuerzo y de la resistencia en la interfase; b) el producto de reacción, Al_4C_3 , es inestable en ambientes húmedos ($Al_4C_3 + 12H_2O = 4Al(OH)_3 + 3CH_4$), por lo que se incrementa la susceptibilidad a la corrosión; c) la reacción incrementa el contenido de silicio de la matriz, por lo que la composición puede cambiar considerablemente si la reacción ocurre ampliamente y d) si esto último es el caso, la formación de Al_4C_3 incrementa sustancialmente la viscosidad del baño fundido, haciendo difícil su vaciado en moldes de formas complejas.

Los estudios de la degradación del SiC en aluminio líquido [39, 41, 42] revelan que el Al_4C_3 no crece como una capa continua sobre el sustrato de SiC. Sin embargo, se ha observado que en la etapa inicial nuclean pequeños cristales, en sitios específicos, los cuales posteriormente coalescen y forman precipitados de Al_4C_3 .

Los cristales de Al_4C_3 surgen del proceso de recristalización; cuando la superficie de las partículas de SiC entran en contacto con el aluminio fundido, estas se disuelven, produciendo iones de silicio y carbono, mostrada en la reacción 2.2.



Estos iones se alejan de la interfase y migran hacia la matriz por difusión en el líquido. Debido a la alta difusividad y baja solubilidad del carbono en el aluminio líquido, la matriz se satura rápidamente de carbono y comienza la nucleación y precipitación de los cristales de Al_4C_3 sobre la superficie de las partículas de SiC, según la reacción 2.3.



Así, la degradación del SiC por su interacción con el aluminio fundido ocurre de acuerdo a los siguientes pasos:

- 1). Disolución del carburo de silicio.
- 2). Difusión del silicio y carbono alejándose de la interfase SiC/Al hacia el resto del metal líquido.
- 3). La reacción entre carbono disuelto y el aluminio con la consecuente nucleación y precipitación del Al_4C_3 cuando se ha excedido los límites de solubilidad.

El paso que determina la velocidad de la reacción de degradación del SiC en aluminio líquido puede ser la disolución o la difusión del silicio. Los estudios pertinentes [41, 42, 43, 3] establecen que la difusión del silicio es rápida y que la velocidad de disolución química del SiC sólido controla la velocidad de la interacción. La cinética de un sólido disolviéndose en un líquido es (como una primera aproximación) una reacción de orden cero y la conversión incrementa linealmente con el tiempo a temperatura constante. La figura 2.14 muestra los perfiles experimentales y calculados de la

descomposición isotérmica de SiC en Al fundido [42]. En esta gráfica se aprecia que el proceso se desarrolla en dos etapas. En la primera, la velocidad de la reacción es muy rápida y es controlada por la disolución del SiC en el Al líquido. Se observa que en un tiempo muy corto la velocidad de la reacción cambia. Sin embargo y de acuerdo con las observaciones microestructurales, a medida que la conversión incrementa, las partículas de SiC eventualmente son recubiertas por el Al_4C_3 y el aluminio líquido se va enriqueciendo de Si. Por esta razón, el proceso de la reacción cambia de ser controlado por disolución a controlado por difusión, ya que la capa de Al_4C_3 actúa como una barrera de difusión. Además, a medida que la degradación aumenta, la actividad del silicio disuelto en el aluminio también frena la velocidad de la reacción.

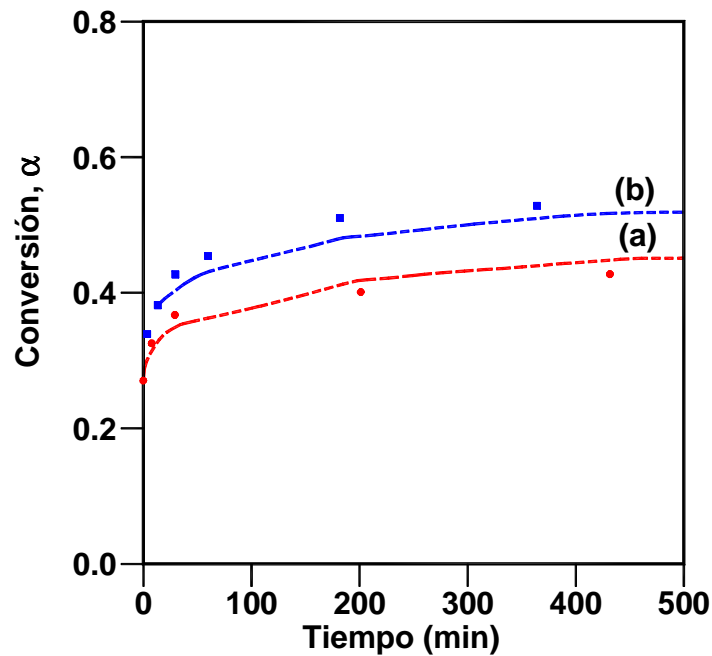


Figura 2.14 Comparación entre cuantificación experimental (símbolos) y por modelo (línea fantasma) de la relación molar, α , de SiC convertido a Al_4C_3 , para muestras de Al-SiC tratadas térmicamente en función del tiempo a dos temperaturas; a) 800 y b) 900°C [42].

La figura 2.15 muestra la dependencia de la velocidad de la reacción entre el SiC y el aluminio líquido con respecto a la temperatura [3]. A partir de la Figura 2.14 se aprecia que después de 1 hora, la fracción de SiC convertido es muy limitada para tiempos más prolongados de permanencia. Por lo que los perfiles de la Figura 2.15 sugieren que hay una cantidad de silicio en el aluminio que inhibe la reacción de degradación.

Debido a los inconvenientes ya mencionados de la degradación del SiC, se han propuesto varios métodos para inhibir este proceso; adición de silicio a la matriz, oxidación del SiC para producir superficialmente una capa de SiO_2 o la aplicación de recubrimientos metálicos. De estos métodos el más popular ha sido la adición de silicio, por lo que las aleaciones de colada han sido las matrices más usadas con SiC como refuerzo y que han tenido mayor impacto comercial. El principio para inhibir la reactividad en el sistema SiC-Al, se basa en que la actividad del Al se ve disminuida al tener Si en el líquido existiendo una composición en equilibrio termodinámico en función de la temperatura para la cual la reacción interfacial SiC/Al se evita. En base a esto, en la literatura [44] se encuentran varios estudios teóricos y experimentales para establecer la cantidad de Si requerido para prevenir la formación de Al_4C_3 . La figura 2.16 muestra comparativamente los resultados de estos trabajos. En general, se observa que los resultados varían considerablemente, lo cual es debido a que la mayoría de los investigadores, exceptuando a Lloyd y Lee únicamente consideraron la variación de la actividad del Si dentro de la matriz, mientras que las variaciones en las actividades del Al no fueron tomadas en consideración en los cálculos.

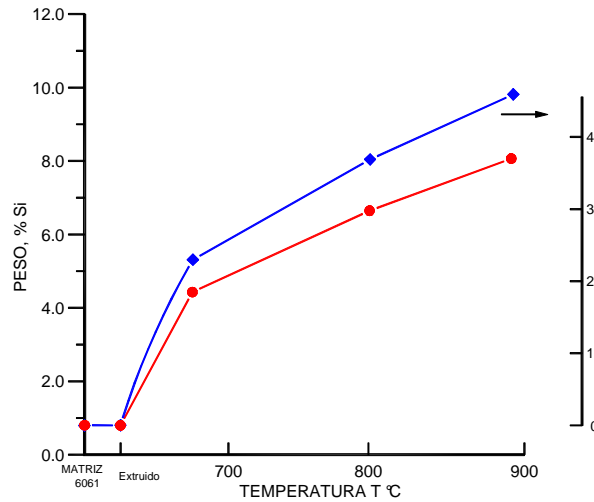


Figura 2.15 Cantidad de SiC convertido a Al_4C_3 en un material compuesto 6061/20%vol.SiC después de 1 hora de permanencia a diferentes temperaturas [3].

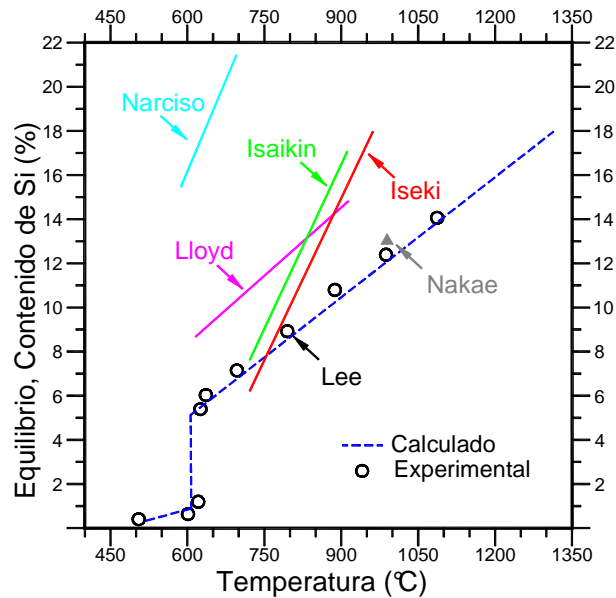


Figura 2.16. Variaciones en los contenidos de Si en equilibrio en el sistema Al/SiC en función de la temperatura [44].

El diagrama de la figura 2.17 muestra la proyección *liquidus* en la esquina rica en Al del sistema Al-Si-C. En este diagrama se presentan las composiciones y temperaturas en las cuales el SiC es estable en aluminio líquido y las condiciones para las cuales se descompondrá dando lugar a la formación de Al_4C_3 y otros carburos complejos.

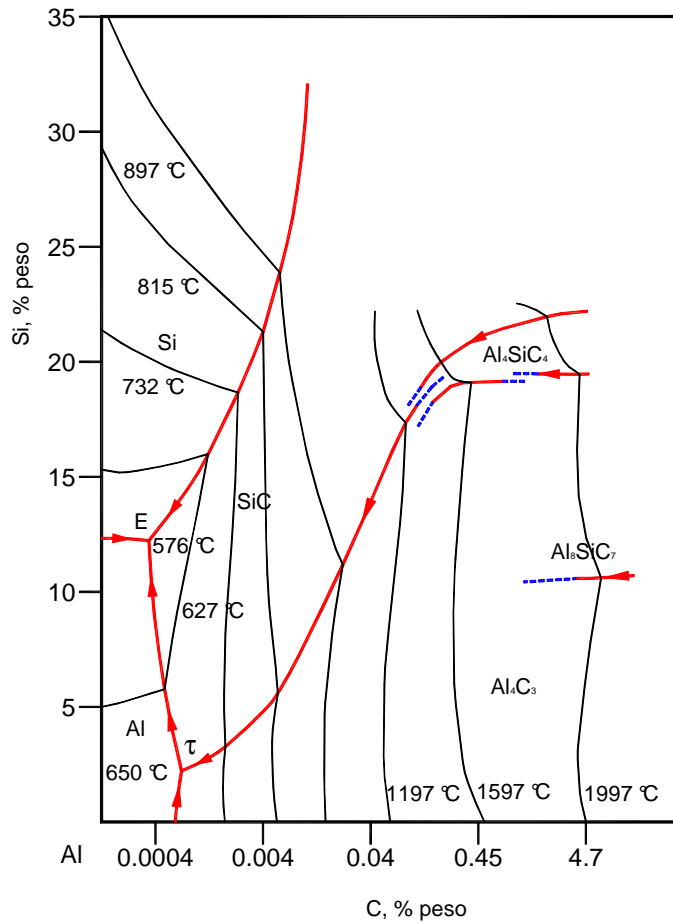


Figura 2.17 Proyección *liquidus* en la esquina rica en Al del sistema Al-Si-C [4].

Por otro lado, Aksenov y colaboradores [4] construyeron las secciones politérmicas mostradas en la figura 2.18 y fabricaron materiales compuestos reforzados con partículas y fibras de SiC con contenidos de 0, 1, 3, 5, 7 y 12% peso de Si. Estos autores trataron térmicamente los materiales fabricados y en general, encontraron buena correlación entre las fases de los diagramas y las encontradas en la caracterización metalográfica de las muestras.

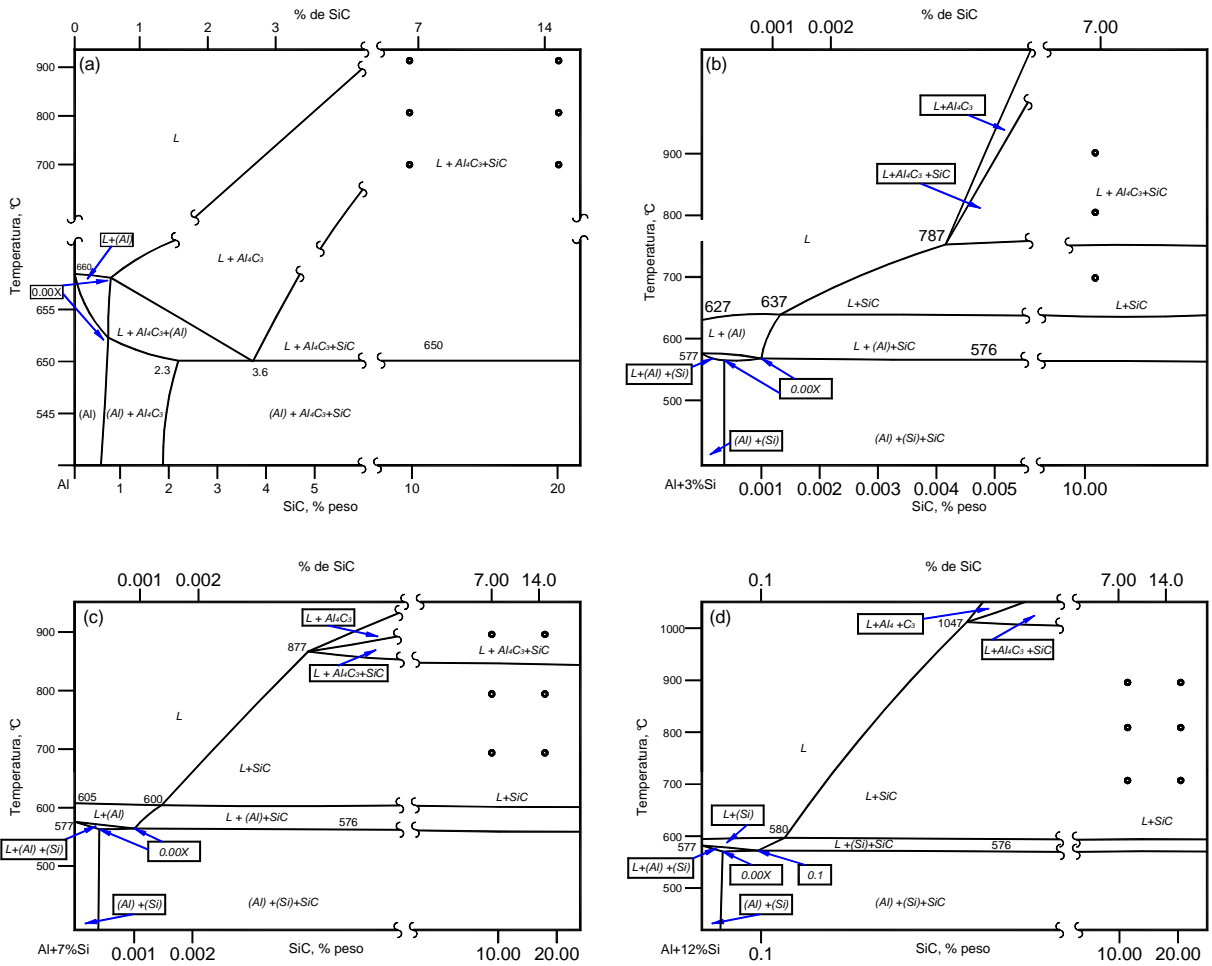


Figura 2.18 Secciones politérmicas del diagrama de fases Al-Si-C; a) Al-SiC, b) Al+3%peso Si-SiC, c) Al+7%peso Si-SiC y d) Al+12%peso Si-SiC.

2.6 Soldabilidad de los materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con SiC.

En la literatura abierta, uno de los primeros reportes respecto a la soldabilidad de MCM reforzados con SiC fue publicado por Ahearn y colaboradores [5]. Estos investigadores soldaron por los procesos TIG y MIG el material compuesto 6061-T6/20%SiC (y otros contenidos de refuerzo) el cual fue manufacturado por la ruta de

metalurgia de polvos. Los resultados mostraron viable la soldadura de este material, sin embargo, antes de soldar fue necesario aplicar un proceso de degasificación en vacío para evitar la formación de macroporosidades como la que se observa en la figura 2.19 a) y obtener el perfil transversal de la figura 2.19 b).

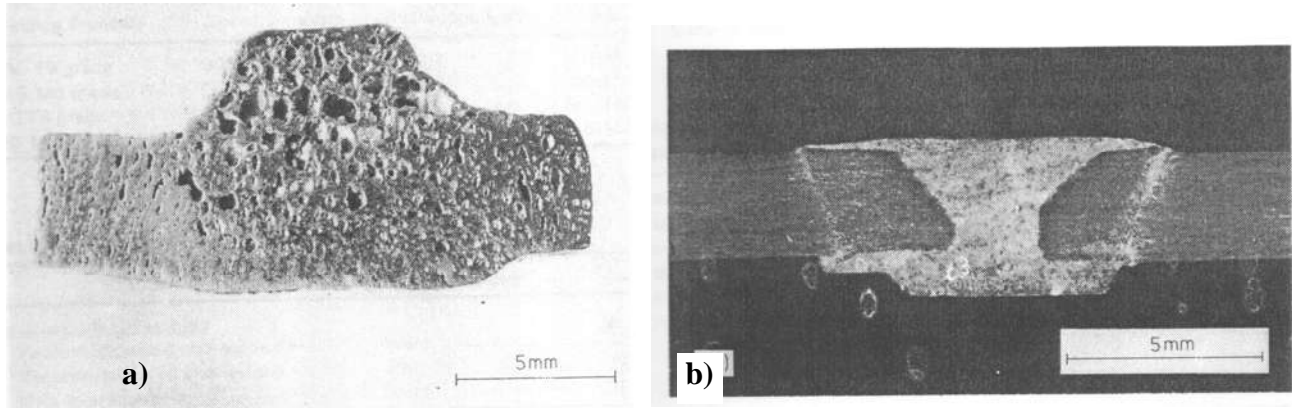


Figura 2.19 Perfiles transversales; a) cordón de soldadura depositado por el proceso TIG en un material 6061/15%SiC en su condición como se recibió y b) soldadura de un material 6061/18%SiC el cual fue degasificado previo al procesos de soldadura [5].

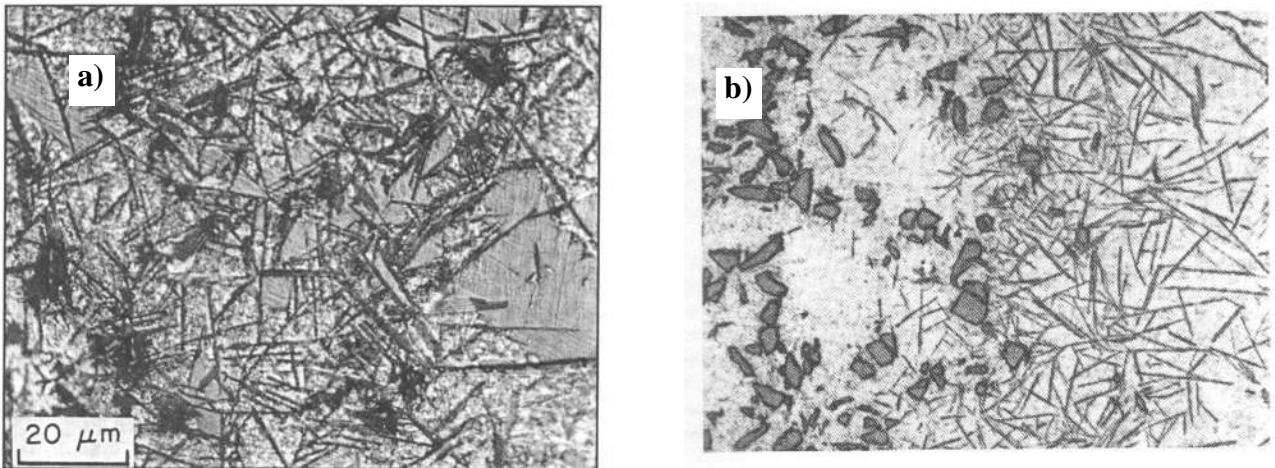


Figura 2.20 Microestructura en la zona de fusión a) de la soldadura por el proceso TIG de un material compuesto 6061/40%SiC [46] y b) de la soldadura por el proceso laser de un material compuesto 2024/15%SiC [47].

También, puntualizaron un incremento en la microdureza de la ZAT del material como resultado de un posible proceso de interacción química entre matriz y refuerzo. Esta interacción fue confirmada posteriormente por otros investigadores [45, 46, 47, 48, 6, 8] que usaron también procesos de soldadura por fusión y se da de acuerdo a la termodinámica expuesta en la sección anterior produciéndose Al_4C_3 con una geometría acicular como la mostrada en la figura 2.20.

Debido a este fuerte inconveniente de la reactividad entre el Al y el SiC, los investigadores se han avocado a buscar alternativas para evitar este problema. Ureña y Gómez de Salazar [49] estudiaron la viabilidad de unir este tipo de MCM por el proceso de difusión utilizando intercapas Al-Li y Al-Cu, encontrando que el uso de la intercapa Al-Li favorece más el rompimiento de la capa de óxido de aluminio para lograr unir estos materiales y no reportaron comportamiento mecánico de las uniones obtenidas. En el mismo contexto, otros investigadores [50] usaron una intercapa Al-Mg-Si para unir por soldadura fuerte en vacío un material compuesto Al/SiC con diferentes características de contenido y tamaño de refuerzo, a pesar de que se logró la unión, la resistencia mecánica fue baja. En otro estudio [51], se investigó el uso de unión por difusión vía una fase líquida transitoria en un material compuesto 2618/SiC_p, para lo cual se utilizó una mezcla de polvos Al-Ag-Cu como intercapa de unión. La caracterización de la unión reveló que esta es porosa por lo que se adicionó Ti a la mezcla de polvos y la calidad de la interfase mejoró notablemente. Usando el mismo concepto de introducir mezclas de polvos como intercapas de unión, Huang y colaboradores [52] unieron un material compuesto 6061/SiC por difusión reactiva con mezclas Al-Si, Al-Cu y Al-Si-SiC. Mientras que las mezcla metálicas condujeron a

uniones sanas en la interfase, la mezcla con SiC dio lugar a uniones con porosidades por la segregación de las partículas. En este estudio, la adición de Ti mejoró la calidad de la unión. La soldadura por fricción con agitación, también ha sido explorada como una alternativa para soldar MCM. Storjohann y colaboradores [53] soldaron exitosamente sin degradación química del refuerzo una matriz de la aleación 2124 reforzada con bigotes de SiC.

Capítulo 3

Procedimiento experimental

3.1 Materiales

El material base usado en este estudio fue un MCM A-359/20%SiC_p recibido en lingote (comercialmente identificado por Duralcan como F3S.20S, los detalles del proceso de su fabricación forman parte de una patente de Duralcan.Inc). El tamaño promedio de las partículas de SiC es de 15 μm. La aleación de aluminio A-359 contiene nominalmente, 8.5 a 9.5%Si y 0.5-0.7%Mg (% en peso). Por medio de una sierra mecánica, se cortaron piezas del lingote de material compuesto y se maquinaron en una fresadora para obtener placas de 12.5 x 40 x 130 mm³. Para llevar a cabo la soldadura, se utilizó un electrodo ER-4043, mostrado en la tabla 3.1, con un diámetro de 1.2 mm. Para la soldadura de las placas, en donde el arco se establece de manera indirecta, se fabricó una aleación Al-7%Si y se maquinaron piezas de esta aleación con las dimensiones; 10 x 5 x 140 mm³ para ser utilizadas como material de alimentación durante la soldadura.

La composición química de los materiales metálicos empleados en este estudio se muestran en la Tabla 3.1. Las placas de alimentación se fabricaron con alto contenido de silicio para no generar una transición abrupta en la composición química del metal de la soldadura, como ya se mencionó, la presencia de silicio previene la

degradación del SiC en el aluminio fundido, además provee la fluidez suficiente en conjunto con el electrodo ER-4043 (que también tiene alto contenido de silicio) para obtener una penetración completa durante la soldadura.

Tabla 3.1. Composición química de los materiales metálicos empleados (% en peso).

Material	% Al	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Cr	% Ni	% Zn	% Ti
ER4043	Bal.	5.25	0.8	0.3	0.05	0.05	----	----	0.10	0.02
A-359	Bal.	9.3	0.11	0.01	<0.01	0.55	----	----	<0.01	<0.02
Al-Si*	Bal.	7.12	0.02	0.001	0.01	0.001	0.01	0.001	0.001	<.01

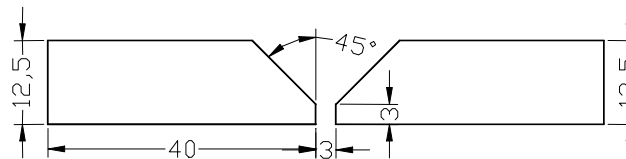
* Placas de alimentación

3.2 Diseño de junta y variables operativas

El diseño de las juntas y sus dimensiones se muestran en la Figura 3.1, mientras que las variables operativas utilizadas se listan en la Tabla 3.2. Se utilizó una fuente de poder de potencial constante de 300 amperios y un voltaje a circuito abierto de 50 voltios, utilizando un ciclo de trabajo del 60% a su máxima capacidad. El voltaje y corriente de soldadura se ajustaron para tener un mecanismo de transferencia por rocío. Los trabajos previamente realizados demostraron que para unir adecuadamente tanto materiales compuestos como materiales monolíticos por medio de la técnica de arco eléctrico indirecto, el precalentamiento de los materiales base es un requisito [10, 11, 54, 55]. Por esta razón, la junta por arco eléctrico indirecto (AEI) fue precalentada a 100°C mientras que la junta por arco eléctrico directo (AED) fue soldada a temperatura ambiente.

Por medio de ensayos preliminares, se determinó que una velocidad de desplazamiento de la torcha de 3.6 mm/s en conjunto con una velocidad de alimentación del electrodo de 18.1 cm/s son adecuados para llenar el vacío de la junta por AEI y obtener fusión lateral de las paredes del material base en una sola pasada de soldadura con penetración completa. Con la misma velocidad de desplazamiento en la junta en simple V (AED) se obtuvo una sobremonta adecuada. En base a estas pruebas preliminares, se empleó la misma velocidad de soldadura para ambas juntas de tal manera que los calores aportados son comparables por pasada de soldadura. Es importante resaltar que para la junta con preparación en simple V fue necesaria la aplicación de tres pasadas de soldadura aplicando el arco directamente sobre las placas de material compuesto, mientras que para la junta por AEI, solamente se requirió de una pasada de soldadura. Así, el calor aportado para la junta por AEI es aproximadamente 1/3 del calor total aportado en la junta por AED.

a) AED



b) AEI

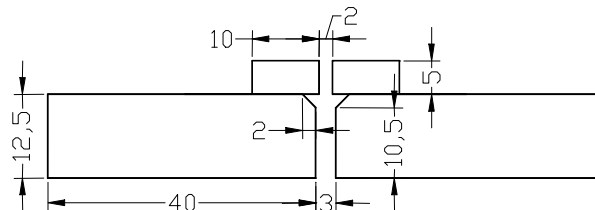


Figura 3.1 Diseño de las juntas y sus dimensiones (mm) cuando el arco es aplicado a) directamente y b) indirectamente.

Tabla 3.2. Parámetros de soldadura utilizados para soldar los materiales compuestos usando AED y AEI.

Parámetro	Valor
Corriente (A)	230 (AEI) / 220 (AED)
Voltaje (V)	21
Velocidad de desplazamiento (mm s^{-1})	3.6
Flujo de argón (L min^{-1})	22
Temperatura de precalentamiento ($^{\circ}\text{C}$)	100 (AEI) / 25 (AED)
Calor aportado (kJ mm^{-1})	1.34 (AEI) / 1.28 (AED)*
Longitud libre del electrode	12 mm

* Por pasada de soldadura

3.3 Caracterización microestructural

Con el propósito de revelar y examinar la microestructura de las juntas soldadas, secciones transversales fueron cortadas y desbastadas con lijas de diferentes granulometrías de SiC para finalmente ser pulidas a espejo con pasta de diamante de 1 μm . Durante todo este proceso, se evitó el uso de agua para prevenir la remoción de Al_4C_3 que pudiera estar presente en la microestructura de las muestras. La caracterización microestructural fue realizada por medio del microscopio óptico y el microscopio electrónico de barrido el cual está equipado con un sistema de espectroscopia de rayos X por dispersión de la energía. También, se caracterizaron las juntas soldadas por medio de difracción de rayos X para identificar las fases presentes. Se utilizó radiación $\text{CuK}\alpha$ con un barrido para 2θ entre $20 - 70^{\circ}$ con un paso de 0.02° .

3.4 Caracterización mecánica

Con el objetivo de detectar las variaciones microestructurales, como resultado de la afectación térmica causada por el ciclo térmico de soldadura, a lo ancho de las juntas soldadas, se realizaron barridos de microdureza con un indentador Vickers mediante la aplicación de una carga de 500 gramos durante 10 segundos. Para observar si existe variación en la microdureza medida con respecto a la carga aplicada, también se realizaron las mediciones usando una carga de 50 gramos por 10 segundos. Las indentaciones fueron realizadas en línea a aproximadamente la mitad de la altura de las soldaduras sobre superficies pulidas a espejo. Para evaluar la resistencia mecánica de las juntas soldadas se llevaron a cabo ensayos de tensión, a temperatura ambiente, utilizando una máquina de tensión universal a una velocidad de desplazamiento de las mordazas de 0.083 mm/s.

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1 Geometría de las soldaduras

En la Figura 4.1 se comparan los perfiles típicos de las secciones transversales de las soldaduras obtenidas por AED y AEI. Estas macrográficas fueron utilizadas para calcular el porcentaje de dilución del material compuesto base de acuerdo a la ecuación dada en la referencia [54];

$$\% \text{ Dilución} = \frac{A}{A + B + C} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

donde A , B y C corresponden a las áreas de las secciones transversales, como se muestra en la Figura 4.2, del material base fundido (A), ranura (B) y refuerzo (C) de la soldadura, respectivamente. Imágenes digitales, a escala 1:1, de los perfiles de soldadura atacados químicamente fueron usados para replicar con AutoCAD 2006, la configuración inicial de las juntas y el contorno de los cordones de soldadura para medir finalmente las áreas que se indican en la Figura 4.2.

Los valores del porcentaje de dilución calculados fueron de 32% y 48.9% para la junta por AED y por AEI respectivamente. Además, las mediciones de las fracciones de área de la Figura 4.2 fueron usadas para estimar el verdadero calor aportado a las placas de material compuesto para la junta por AEI, el cual fue de 1.14 kJ/s

(considerando una eficiencia térmica de 94.8% [54] y una fracción del calor absorbido por las placas de alimentación de 9.84%), mientras que el calor aportado verdadero en la junta por AED fue aproximadamente entre 2.88 y 3.07 kJ/s (considerando la eficiencia térmica entre 75 y 80%). A partir de estos datos, está claro que la afectación térmica verdadera sufrida por el material compuesto base es más grande por un factor de tres, aproximadamente, para la junta por AED que para la junta por AEI.

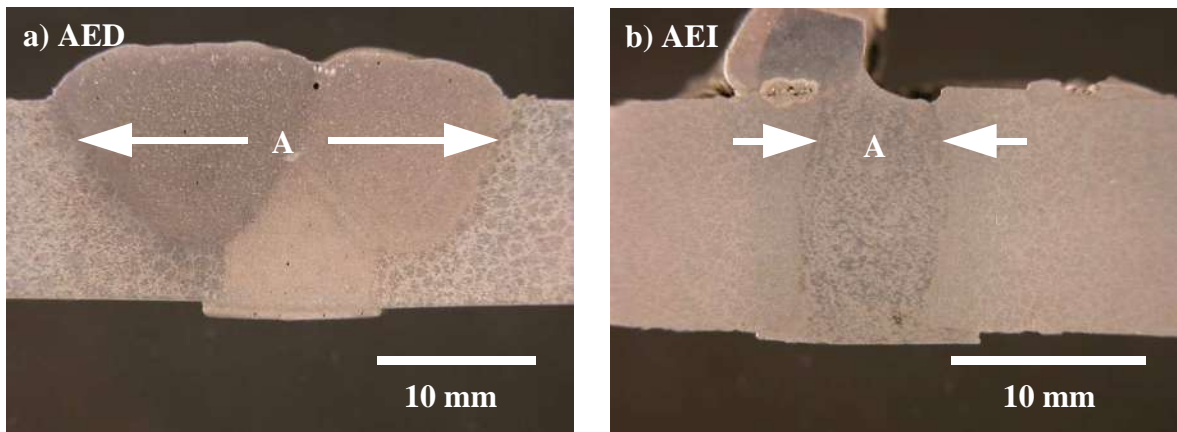


Figura 4.1 Perfiles de los cordones de soldadura depositados por; a) AED a temperatura ambiente y b) AEI a 100°C.

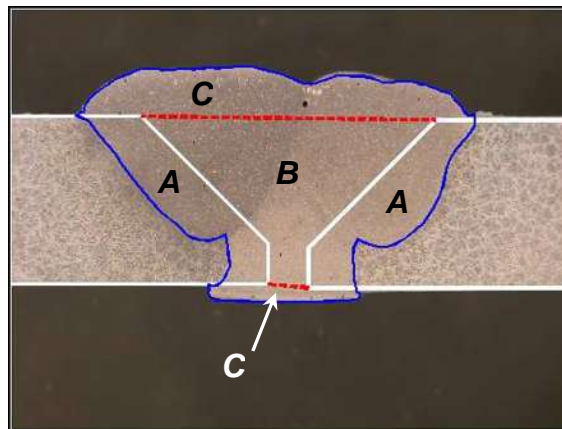


Figura 4.2 Áreas de la sección transversal de las juntas soldadas para el cálculo del porcentaje de dilución. A = material base fundido, B = ranura y C = refuerzo de la soldadura.

Las flechas en la Figura 4.1 indican el ancho del metal de la soldadura en la parte superior de la junta soldada. El ancho de la junta por AEI varió entre 5 y 7 mm mientras de la junta por AED tiene aproximadamente 10 mm y 28 mm en la parte inferior y superior respectivamente. Las tres pasadas de soldadura están claramente delineadas en la Figura 4.1a) y se observa la presencia de macroporosidad principalmente en la parte superior de la soldadura (Los poros más grandes aparecen como glóbulos negros, mientras que los puntos blancos son poros de menor tamaño). El uso del diseño de junta por AEI produce perfiles de soldadura uniformes, como se aprecia en la Figura 4.1b), con penetración completa y sin signos de falta de fusión de las paredes laterales del material base con solamente una pasada de soldadura con previo calentamiento de la junta a 100°C. Para esta junta soldada se observa poca macroporosidad y una gran cantidad de partículas de SiC incorporadas en el metal de la soldadura.

En estudios previos [54], se demostró que la aplicación del arco eléctrico de manera indirecta incrementa la eficiencia térmica del proceso de soldadura con protección de gas y electrodo metálico consumible, debido al establecimiento y estabilización del arco eléctrico de manera oculta. Esta particularidad del proceso minimiza las pérdidas de calor y reduce la cantidad de material base fundido lateralmente. Por consiguiente, la afectación térmica del material base también es reducida. Con estas características, el diseño de junta por AEI permite soldar materiales monolíticos y compuestos (con diferentes contenidos de refuerzo cerámico) con espesores de 12.7 mm en una sola pasada de soldadura.

Es importante tener en cuenta que la mayoría de los intentos por resolver la problemática de soldar MCM se han realizado en secciones delgadas o mediante la aplicación de cordones de soldadura sobre placa [5-8] y que cuando los estudios se han enfocado en secciones de espesores mayores, se ha requerido típicamente el uso de varias pasadas de soldadura para soldar exitosamente secciones más gruesas de 6 mm [56], como se necesitó en el presente estudio para el diseño de junta en simple V (AED). Una posible desventaja de las juntas soldadas por AEI es la presencia de las placas de alimentación después de la soldadura. Esta característica no se debe considerar como un gran inconveniente para el uso del AEI, ya que el remanente de las placas de alimentación puede ser fácilmente removido y en algunos casos estas se desprenden durante la depositación del cordón de soldadura. Tal fue el caso en el lado derecho de la soldadura mostrada en la Figura 4.1b).

4.2 Microestructura de las juntas soldadas

La Figura 4.3 muestra las características microestructurales del material compuesto comercial A359/20%SiC_p tal y como fue recibido del fabricante. Se puede apreciar que las partículas de SiC están razonablemente bien distribuidas a pesar de que están posicionadas en los brazos dendríticos convergentes en las regiones intercelulares junto con silicio eutéctico y precipitados Al-Si-Fe y Al-Si-Fe-Mg, los cuales claramente delimitan los límites de las células. Los intermetálicos que contienen Fe, se distinguen en la micrografía de la Figura 4.3c) como la fase clara. En las micrografías también se aprecia claramente el nivel de porosidad que va de micro a macroporos. La examinación detallada de la microestructura no reveló signos visibles de reacción entre

la matriz y el refuerzo, ya que en general, los bordes de las partículas de SiC están bien delineados (bordes rectos) y angulares.

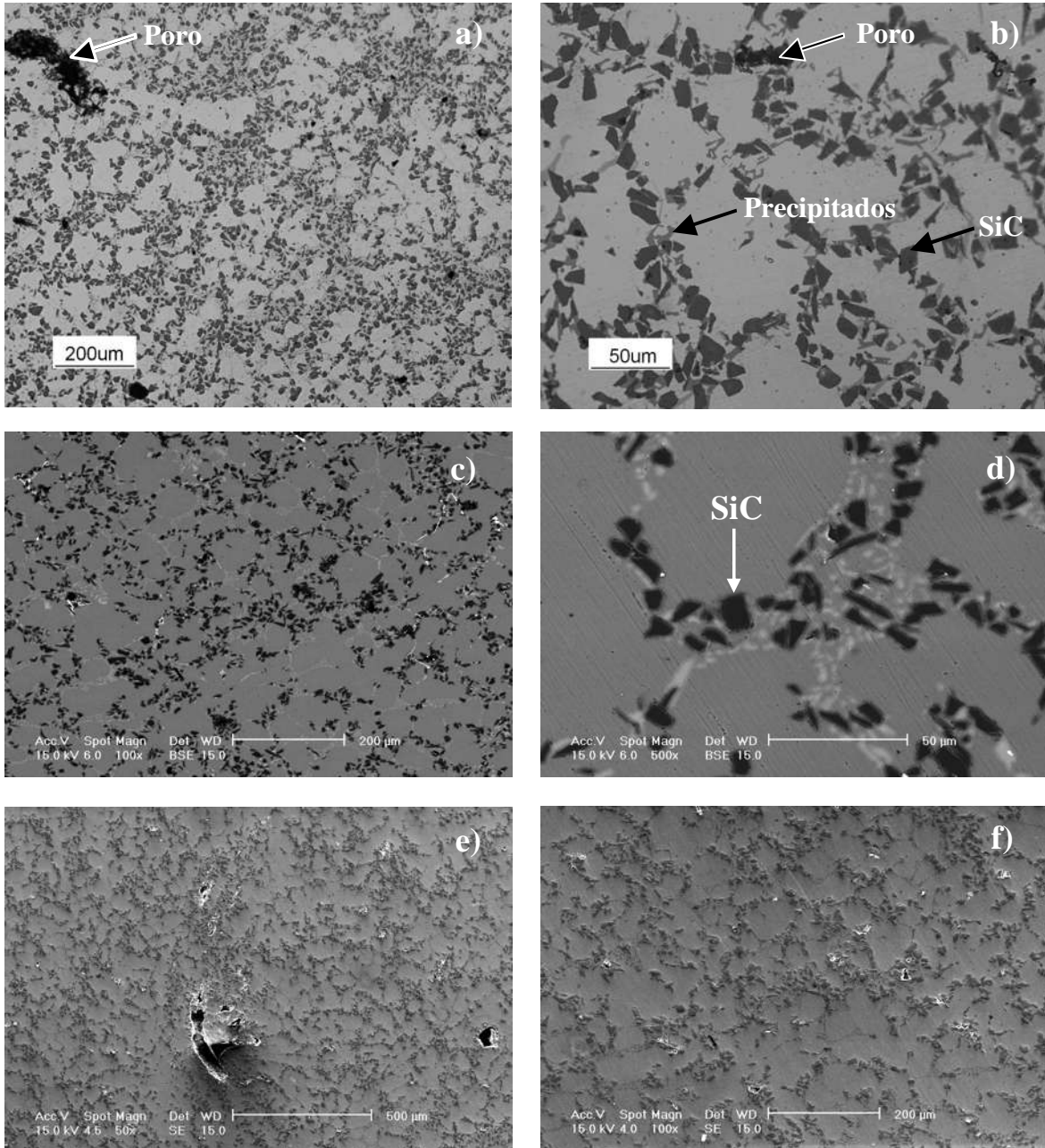


Figure 4.3 Características microestructurales del material compuesto A-359/20%SiC_p. a) y b) micrografías ópticas, c) y d) micrografías por electrones retrodispersados y e) y f) micrografías por electrones secundarios.

La Figura 4.4 muestra la microestructura obtenida por medio de la junta AEI en la parte baja del cordón de soldadura. El ensamble de micrografías a lo ancho del cordón de soldadura confirma que una gran cantidad de partículas de SiC se incorporaron y dispersaron en la pileta líquida de soldadura como resultado de una fusión uniforme a lo largo de la altura de las paredes de las piezas de trabajo.

Por medio de análisis de imágenes se llevó a cabo una cuantificación aproximada del nivel de refuerzo en el metal de la soldadura, siendo este de 12% en volumen. Este porcentaje de refuerzo en el metal de la soldadura es bastante consistente con la dilución estimada del material base para la junta por AEI. La presencia de porosidad en la soldadura también es visible. Debido a que los poros son similares a los observados en el material compuesto base y debido a que estos se encuentran posicionados principalmente en la vecindad con la línea de fusión, se asume que la mayor parte de esta porosidad fue arrastrada desde las paredes laterales del material compuesto base.

A lo largo del espesor de la soldadura no se encontraron signos de falta de fusión entre el metal de la soldadura y las paredes laterales de las piezas de trabajo, al contrario, se observó la continuidad entre el metal de la soldadura y la matriz del material compuesto como se puede ver en la Figura 4.5 a mayor magnificación. En este ensamble de imágenes se pueden distinguir tres zonas; el material compuesto base (MCB), una zona parcialmente fundida (ZPF, la cual tiene un ancho aproximado de 420 μm) y el metal de la soldadura.

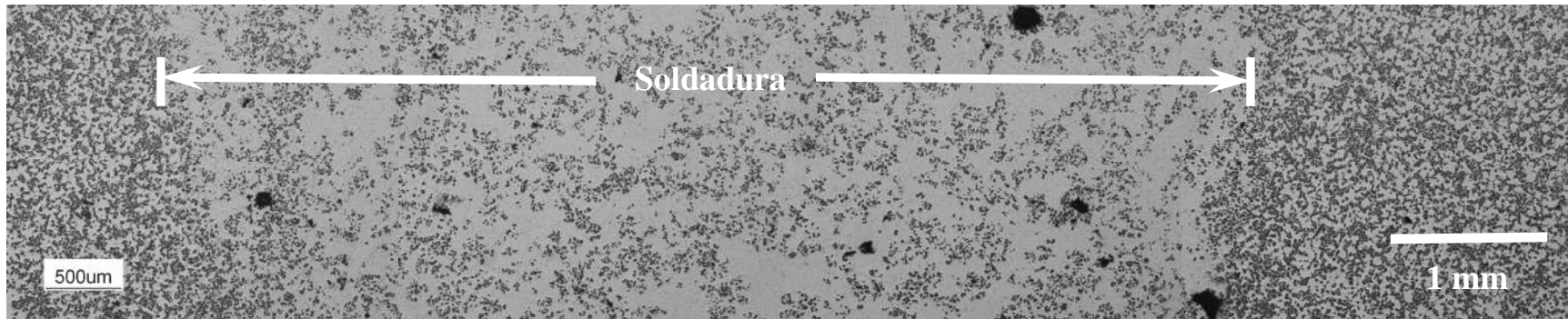


Figura 4.4 Microestructura en la parte inferior de la soldadura obtenida por AEI.

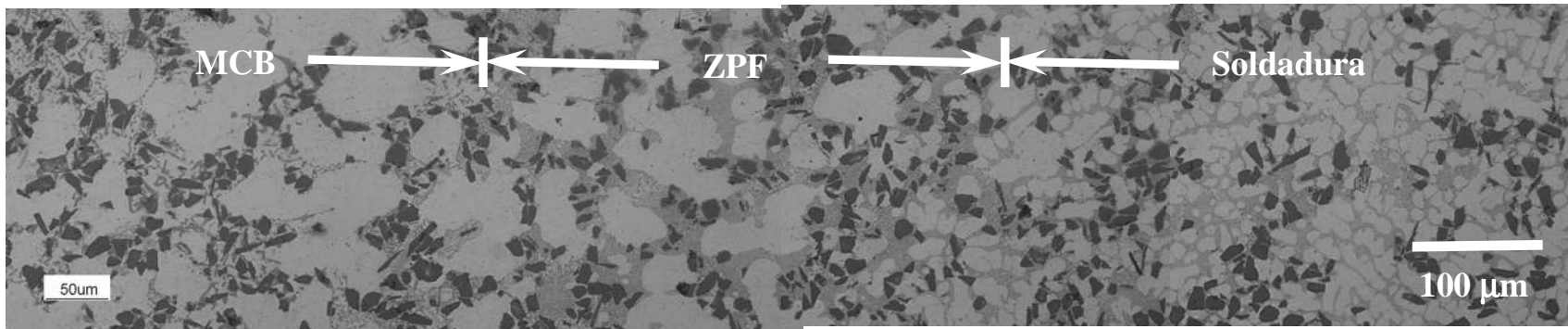


Figura 4.5 Microestructura típica de la interfase metal de la soldadura/material compuesto base de la junta soldada por AEI.

Considerando las características microestructurales de la Figura 4.5 a detalle, se observa que la línea de fusión y la ZPF se caracterizan por la aglomeración de precipitados muy finos en las fronteras de grano como se muestra claramente en la Figura 4.6a. Sin embargo, este amontonamiento de precipitados finos da la apariencia de engrosamiento de los mismos en la Figura 4.5. El metal de la soldadura exhibe una estructura celular dendrítica refinada como se aprecia en la Figura 4.6b. Este refinamiento es causado por las altas velocidades de enfriamiento [1, 57] que ocurren en la pileta líquida de soldadura y el tamaño de las células es aproximadamente del mismo tamaño que las partículas de SiC. Es importante señalar, que el tamaño de las células no es determinado por la presencia de las partículas de SiC ni por su tamaño [1, 57]. En este caso, micrografías de la Figura 4.6, las partículas de SiC quedan también atrapadas entre las dendritas que convergen durante la solidificación.

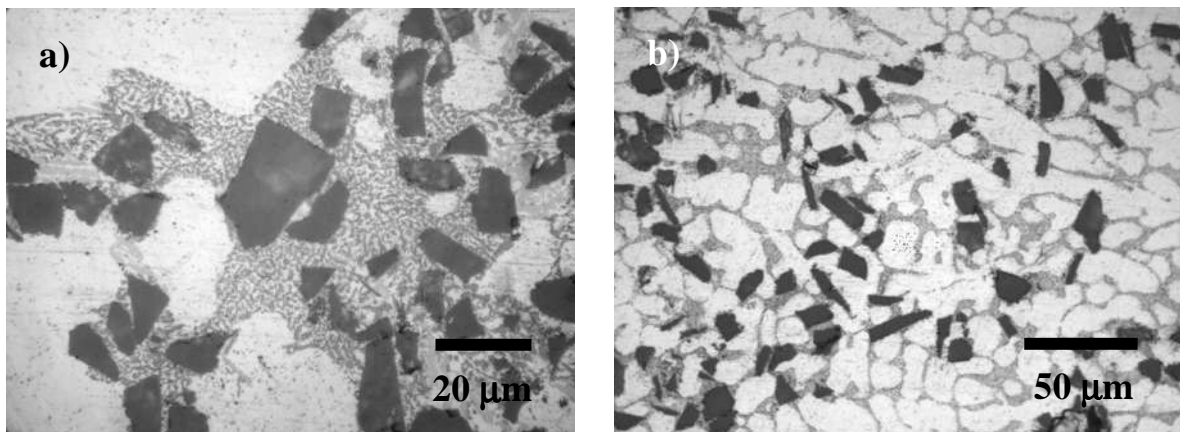


Figura 4.6 Detalles de las características microestructurales de la soldadura obtenida por AEI en; a) la ZPF y b) en el centro del metal de la soldadura.

La disolución de las partículas de SiC se caracteriza típicamente por la presencia de agujas alargadas de Al_4C_3 o Al_4SiC_4 cuando el grado de reacción es severo o por la nucleación y crecimiento de bloques de Al_4C_3 sobre la superficie de las partículas de SiC cuando la reacción es moderada. Las observaciones microestructurales realizadas tanto en el microscopio óptico como en el electrónico de barrido no revelaron algunos de estos signos de reacción en el metal de la soldadura ni en la zona afectada térmicamente del material base. En las imágenes de la Figura 4.6 se puede observar que después del severo pero rápido ciclo térmico de soldadura, las partículas de SiC expuestas a este proceso conservaron sus características morfológicas iniciales.

Caracterización complementaria por medio de difracción de rayos X confirmó la no degradación de las partículas de refuerzo durante la soldadura como se muestra en la Figura 4.7 en la cual únicamente se aprecia la presencia de las reflexiones correspondientes a las fases, SiC, Si y Al con otras reflexiones de baja intensidad de intermetálicos que también fueron detectados por espectroscopia de rayos X por dispersión de la energía en el microscopio electrónico de barrido. Es importante señalar, que la resolución de la técnica de difracción de rayos X está entre 2 y 3% en peso. La gráfica de la Figura 4.7 muestra también el espectro de difracción de rayos X de la soldadura obtenida por AED. En términos generales, no se puede señalar alguna diferencia apreciable entre los espectros, excepto la mayor intensidad de la reflexión principal para los picos de Si y SiC para la junta soldada obtenida por AEI, lo cual es debido al uso de las placas de alimentación que contienen 7% en peso de silicio y a la considerable incorporación de partículas de SiC en la pileta líquida de soldadura.

Por otro lado, las diferencias microestructurales entre las dos juntas soldadas se pueden evidenciar por medio de las micrografías ópticas de las Figuras 4.8 y 4.9. Para comenzar, se observa que una gran fracción del metal de la soldadura para la junta obtenida por AED no exhibe la presencia de partícula de SiC, sobre todo en la segunda y tercera pasada de soldadura, y en aquellas pequeñas regiones en donde hay partículas, estas se encuentran aglomeradas en racimos. También, se observó una considerable presencia de macro y microporosidad y que el ancho de la zona parcialmente fundida tiene un ancho de 4500 μm en lo que corresponde a mitad del espesor de las placas soldadas. Esta zona es significativamente mayor que la que se muestra en la Figura 4.5, la cual tiene un ancho aproximado de 400 μm .

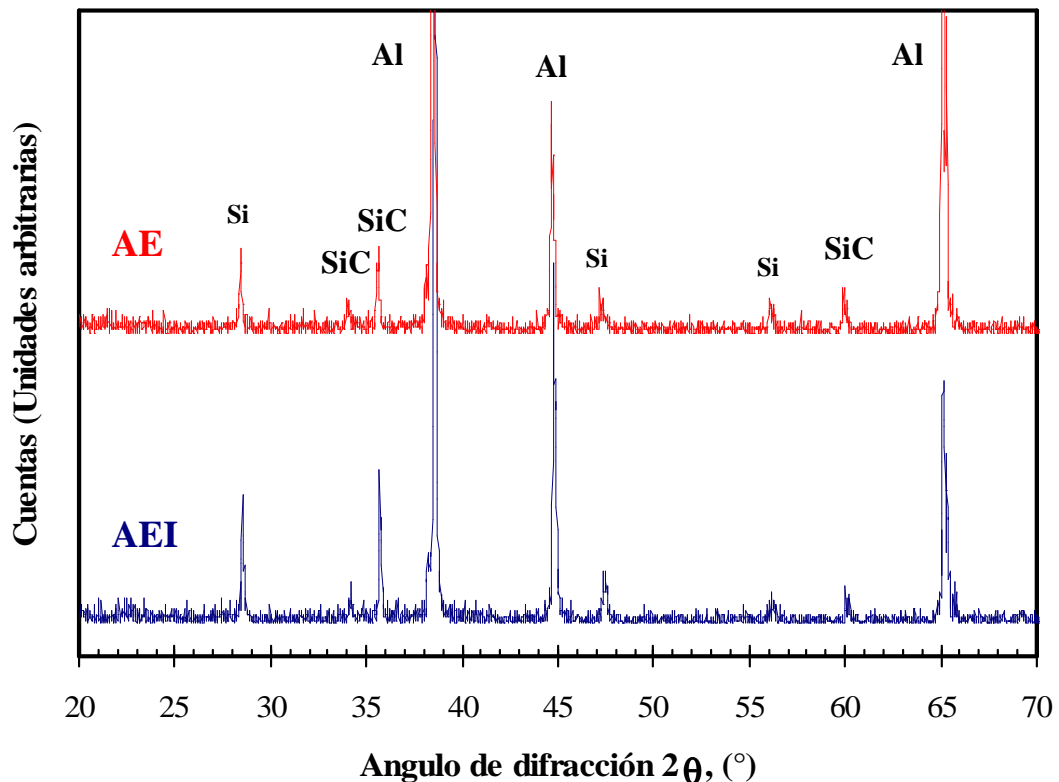


Figura 4.7 Espectros de difracción de rayos X de las juntas soldadas obtenidas por AEI y AED.

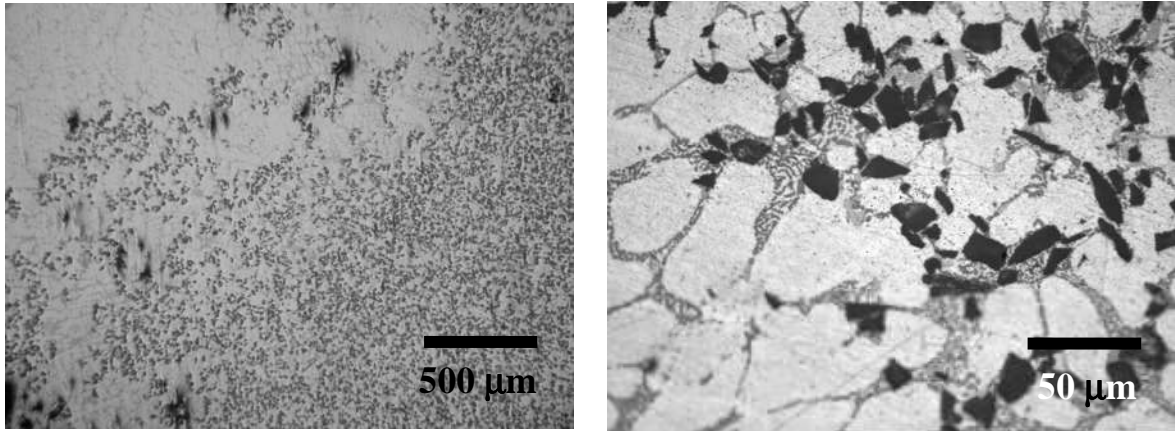


Figura 4.8 Microestructura en la interfase metal de la soldadura/material base de la junta soldadura obtenida por AED a baja y alta magnificación.

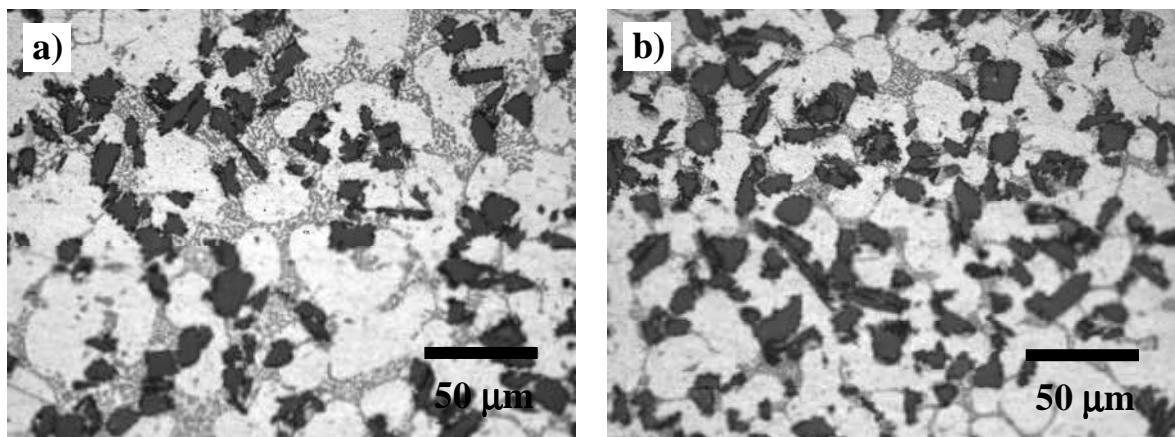
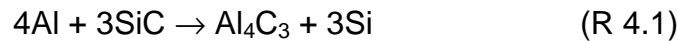


Figura 4.9 Detalles microestructurales de la soldadura por AED en, a) la pasada de raíz y b) la parte superior del metal de la soldadura.

Considerando el detalle de la micrografía de la Figura 4.8 a alta magnificación, no se observan signos de reacción entre el refuerzo y la matriz en la transición del metal de la soldadura y el material base. Sin embargo, las partículas distribuidas homogéneamente en la pasada de raíz y aglomeradas en racimos en la parte superior de la soldadura, exhiben contornos que asemejan dientes de sierra. Esta alteración morfológica indica, sin lugar a dudas, que ocurrió degradación moderada durante la

soldadura y que el grado de disolución del SiC al reaccionar con el aluminio para formar Al_4C_3 es muy bajo para poder ser detectado por medio de la técnica de difracción de rayos X.

En el capítulo correspondiente a la revisión de la literatura quedo evidenciado que el sistema Al-SiC ha sido ampliamente estudiado y su termodinámica está bien establecida [1-4]. Entre 650 y 1323 °C, el SiC reacciona con el aluminio de acuerdo a la reacción 4.1.



y la cinética de la reacción incrementa con la temperatura. En el rango de temperaturas entre 1323°C y 1627°C, tiene lugar otra reacción que conduce a la formación del carburo complejo Al_4SiC_4 . Si la temperatura se incrementa aún más, se precipita otro carburo ternario, Al_8SiC_7 [1-4]. Para evitar la descomposición del SiC con el aluminio líquido, es necesaria la presencia de silicio en función de la temperatura, es decir, entre más alta sea la temperatura del sistema, más contenido de silicio es demandado.

Para las soldaduras de este estudio, el contenido de silicio está entre 9.5 y 5.5% en peso (los límites quedan establecidos en función del contenido de silicio en el material base y en el electrodo), siendo el valor para la junta soldada por AEI ligeramente mayor que para la soldadura obtenida por AED. Considerando el límite superior de 9.5% en peso, la termodinámica predice que el SiC es inestable en aluminio líquido aproximadamente por arriba de 890°C [2, 4]. Esta temperatura fue excedida por mucho en la pileta líquida de soldadura al soldar las piezas de trabajo. Sin embargo, en ninguno de los dos casos se observó disolución masiva de las partículas de SiC. Si bien este comportamiento no obedece las predicciones termodinámicas, si se puede explicar

con dos aspectos; el ciclo térmico de soldadura es muy rápido y por otro lado, el contenido de silicio relativamente alto, retarda la cinética de la reacción [4].

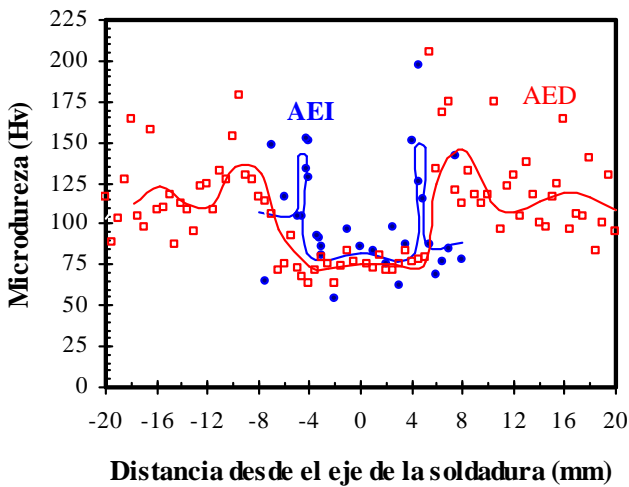
Se puede argumentar que la leve reactividad observada para la junta soldada por AED ocurrió debido a la exposición directa del material compuesto base a las altas temperaturas del arco eléctrico y por el alto aporte térmico absorbido en un volumen de material pequeño, como se resaltó en la sección 4.1. En el otro caso, el arco eléctrico impacta indirectamente sobre las placas de alimentación, estableciéndose de manera indirecta para formar una pileta líquida de soldadura que alimenta la ranura de la junta con material fundido a alta temperatura. El calor sensible de este líquido es suficiente para fundir las paredes laterales de los materiales base en su descenso hasta el fondo de la junta. De esta manera, el calor aportado es disipado por un volumen más grande de material. A través de este mecanismo de fusión y unión, se reduce la afectación térmica de la junta soldada y, al menos bajo la resolución del microscopio electrónico de barrido, previene las interacciones químicas entre la aleación Al-Si fundida y las partículas de SiC, haciendo posible la soldadura de secciones gruesas.

4.3 Propiedades mecánicas y fractura

La Figura 4.10 muestra los perfiles transversales de microdureza Vickers realizados en ambas juntas soldadas, AED y AEI, mediante la aplicación de cargas de 50 y 500 g. La comparación de los perfiles de microdureza muestra que la junta obtenida por AED es más ancha que la de AEI, lo cual concuerda con lo observado en las macrografías de la Figura 4.1. También se aprecia que los valores promedio de microdureza en el metal de la soldadura son similares para ambas juntas, siendo los

valores para la junta por IEA ligeramente mayores. El incremento alto en la dureza observado en otros estudios [5, 6] como resultado de una severa disolución del SiC no se observó en el presente estudio, lo cual es debido a que la reactividad observada en las juntas soldadas fue muy ligera para la junta por AED y nula para la junta por AEI.

a) 50 g



b) 500 g

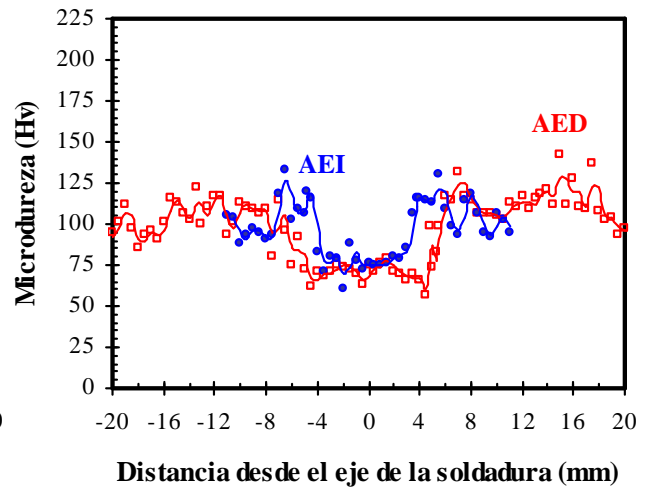


Figura 4.10 Perfiles transversales de microdureza Vickers de las juntas soldadas con la aplicación de; a) 50 y b) 500 g de carga.

El perfil transversal de microdureza, Figura 4.10a), generado con la aplicación de una carga de 50 g exhibe un mayor rango de variación de la microdureza en las diferentes regiones. La aplicación de una carga pequeña permite apreciar el efecto del refinamiento del eutéctico Al-Si en la zona parcialmente fundida para ambos perfiles, este efecto se refleja en altos valores de microdureza. Los puntos dispersos con altos valores de microdureza en el material base corresponden a indentaciones realizadas aleatoriamente sobre partículas de SiC. Por otro lado, la gráfica de la Figura 4.10b) revela que la aplicación de una carga significativamente más grande genera perfiles

más uniformes, es decir que el rango de variación de la microdureza para una región determinada de la soldadura es pequeño. La medición de microdureza en improntas que son más grandes que el ancho de las cadenas de eutéctico refinado en la zona parcialmente fundida, hacen que esta variación microestructural no se refleje de manera tan marcada como cuando se usan cargas pequeñas.

Con respecto a los ensayos de tensión, la falla mecánica ocurrió consistentemente en el metal de la soldadura para ambas juntas soldadas. La resistencia a la ruptura fue de 209 y 234 MPa para las soldaduras con la aplicación del arco eléctrico de manera directa e indirecta respectivamente. Considerando que la resistencia a la ruptura del electrodo ER-4043 y del material compuesto base son 190 y 262 MPa respectivamente, parece ser que la resistencia de las soldaduras obtenidas por AED y AEI ésta relacionada con la resistencia del electrodo y del material base respectivamente.

La Figura 4.11 muestra las características de las fracturas que presentan las soldaduras después de fallar mecánicamente bajo esfuerzo de tensión. Estas fractografías evidencian los niveles más altos de porosidad encontrados en la junta soldada por AED, en donde está claro que la trayectoria de la fractura fue dictada por estos defectos. Para la junta soldada por AEI, las características observadas a mayores magnificaciones revelan desunión en la interfase partícula/matriz y generación de microvacíos u hoyuelos así como agrietamiento y fractura de intermetálicos asociados a las partículas de SiC (Figura 4.12). Estos son los rasgos típicos de los mecanismos de falla reportados por otros investigadores en materiales compuestos Al-Si/SiC [1, 8].

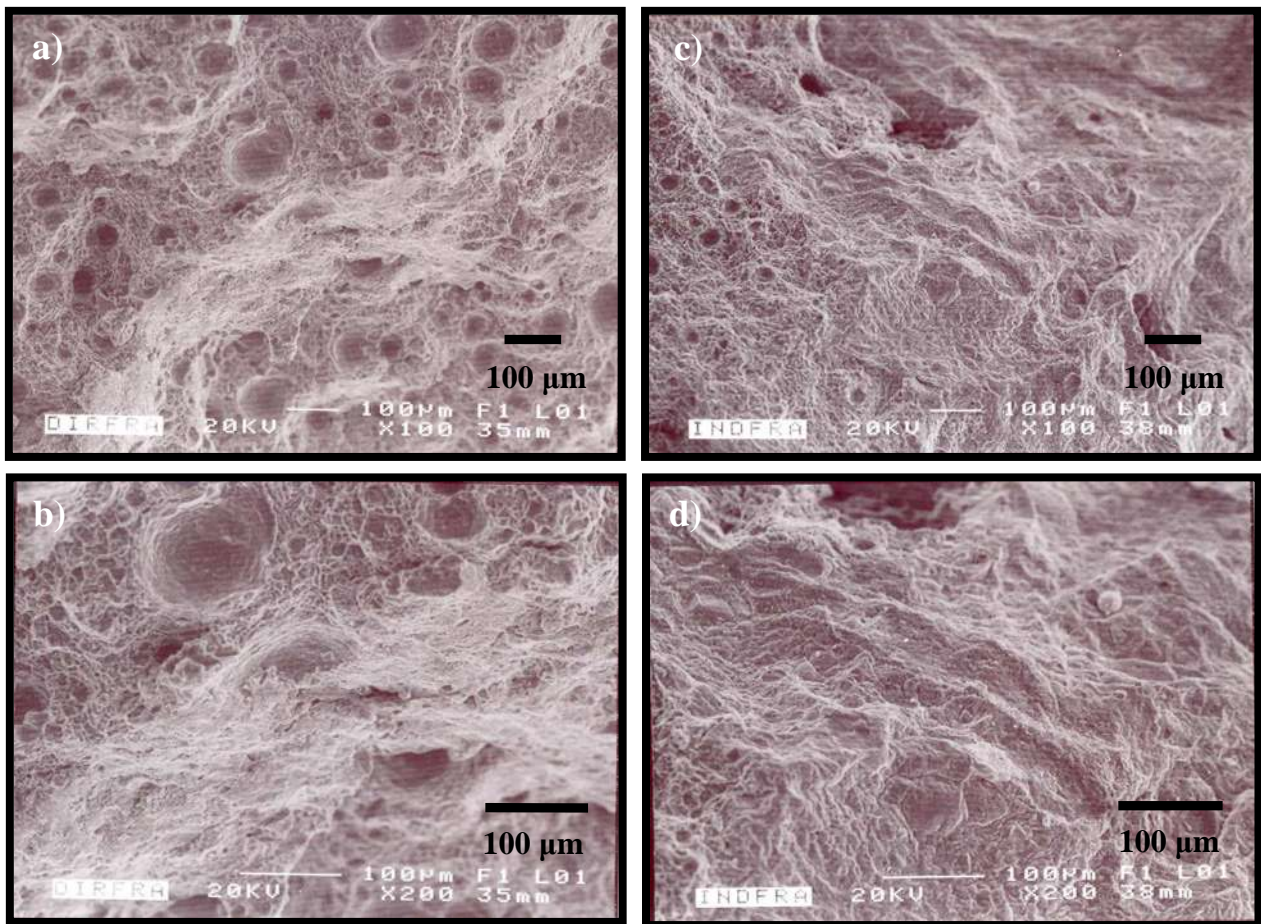


Figura 4.11 Fractografías de las muestras ensayadas a tensión; a y b) AED, c y d) AEI.

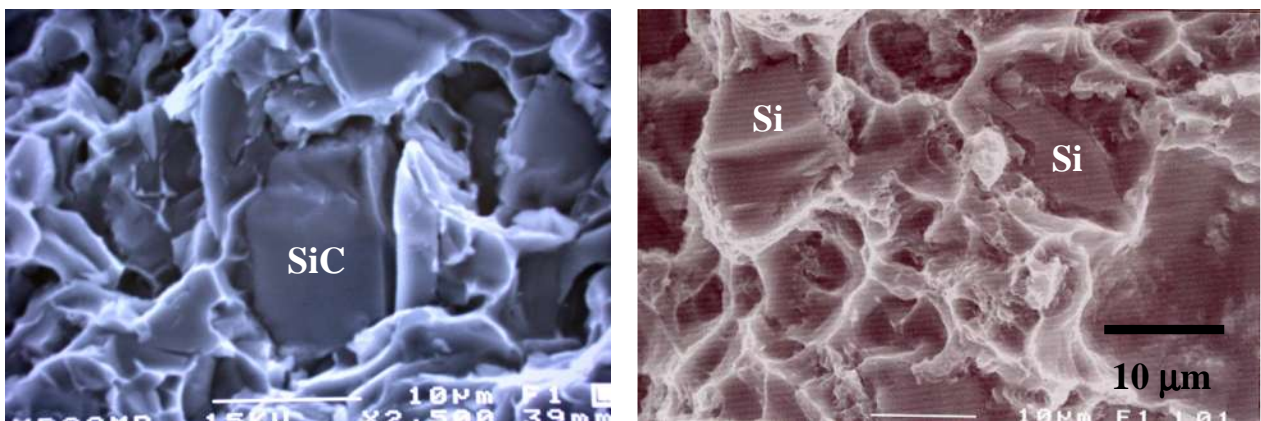


Figura 4.12 Detalles de la fractura en la soldadura obtenida por AEI.

El hecho de que la falla ocurriera en el metal de la soldadura es una indicación de la buena unión lograda en la interfase, metal de la soldadura/material base, independientemente del método de soldadura empleado. Así, el contenido relativamente alto de cerámico no es un obstáculo para la soldadura de este tipo de material compuesto y la resistencia más alta obtenida para la junta soldada por AEI fué debida a los bajos niveles de porosidad observados y a la mayor incorporación de partículas de SiC en el metal de la soldadura. La reactividad moderada que se observó en la junta soldada por AED jugó probablemente un papel menor en el comportamiento mecánico de esta soldadura. A largo plazo, la soldadura por AEI garantiza un mejor rendimiento ya que no se observó signos de reactividad contrario a la junta por AED en la cual la presencia moderada de Al_4C_3 la hace susceptible a la corrosión en ambientes húmedos.

Capítulo 5

Conclusiones

- Se soldaron exitosamente placas de 12.7 mm de espesor del material compuesto comercial A-359/20%SiC_p por medio del proceso de soldadura de arco metálico con protección gaseosa y electrodo consumible aplicando el arco eléctrico de manera directa e indirecta.
- Para la junta por AED fue necesario depositar tres cordones de soldadura mientras que para la junta por AEI, un solo depósito fue suficiente para unir las placas.
- Con la junta por AEI se obtuvo una junta soldada con poca porosidad, sin signos visibles de reacción entre la matriz y el refuerzo y con una mayor incorporación de partículas de SiC en la pileta líquida de soldadura, las cuales se dispersaron de manera bastante homogénea.
- Como resultado del mayor aporte térmico para la soldadura por AED, se observó cierto grado de degradación de las partículas de SiC que se incorporaron en el metal de la soldadura y que quedaron aglomeradas.
- La incorporación y dispersión de partículas en la pileta líquida de soldadura se reflejó en una mayor resistencia a la ruptura de 234 MPa para la junta por AEI en comparación con la resistencia de 209 MPa registrada para la junta por AED.

- En la soldadura por AED se observó mayor porosidad, este aspecto fue determinante en la propagación de la falla de la junta soldada durante el ensayo de tensión.
- Así, la técnica de soldadura por arco eléctrico indirecto con el proceso de soldadura MIG se perfila como una buena alternativa para soldar por fusión con arco eléctrico materiales compuestos Al-Si/SiC con una baja afectación térmica que minimiza la reactividad entre matriz y refuerzo.

Bibliografía.

1. D. J. LLOYD, *Compos. Sci. Technol.* 35 (1989) 159.
2. J. C. VIALA, P. FORTIER and J. BOUIX, *J. Mater.Sci.* 25 (1990) 1842.
3. J. C. VIALA, F. BOSSELET, V. LAURENT and Y. LEPETITCORPS, *J. Mater. Sci.* 28 (1993) 5301-5312.
4. A. A. AKSENOV, N. A. BELOV and S. V. MEDVEDEVA, *Z. Metallkd.* 92 (2001) 1103.
5. J. S. AHEARN, C. COOKE and S. G. FISHMAN, *Met. Constr.* 14 (1982) 192.
6. J. T. LIENERT, E. D. BRANDON and J. C. LIPPOLD, *Scripta Metall. Mater.* 28 (1993) 1341.
7. F. BONOLLO, A. TIZIANI and M. PENASA, *Int. J. of Mater. Product Technol.* 17 (2002) 291.
8. A. UREÑA, M. D. ESCALERA and L. GIL, *Compos. Sci. Technol.* 60 (2000) 613.
9. D. B. MIRACLE, *Compos. Sci. Technol.* 65 (2005) 2526.
10. R. GARCIA, V. H. LOPEZ, E. BEDOLLA and A. MANZANO, *J. Mater. Sci. Let.* 21 (2002) 1965.
11. R. GARCIA, V. H. LOPEZ, E. BEDOLLA and A. MANZANO, *J. Mater. Sci.* 38 (2003) 2771.
12. M. P. GROOVER, *Fundamentos de Manufactura Moderna.* (2007)
13. A. CONTRERAS, *Fabricación y caracterización de materiales compuestos Al-2024/TiC por la técnica de infiltración inducida por capilaridad.* Tesis Maestría, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas-UMSNH, Morelia, Mich. (1998).
14. V. LÓPEZ, *Fabricación del material compuesto Al/TiC por la técnica de infiltración sin presión externa.* Tesis Licenciatura, Escuela de Ingeniería Mecánica-UMSNH, Morelia, Mich. (1997).
15. Alcan Inc., *Metal matrix composites properties*, <http://www.temponik.dk/files/Casting%20Guidelines%20%28%29.pdf>, consultado en octubre de 2011.
16. *ASM 2 Metals Handbook*, ASM International, Materials Park, OH, (1990).
17. D. ASKELAND, *Ciencia e ingeniería de los materiales*, pp 508-552, (1998).
18. M. SALAZAR. *Fabricación de un Compósito Al-6061/TiC por la técnica de infiltración inducida por capilaridad.* Tesis Maestría, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas-UMSNH, Morelia, Mich., (1998).
19. M. FERNÁNDEZ, V MARTÍNEZ, M. VALENCIA, J. CRUZ, *Applications of metal matrix composites in electric and electronic industries.* (2005)
20. A. CORONEL, A. D. MAZZONI, *Preparación y sinterizados de polvos de BaZrO₃.*
21. D. GLASS, *Ceramic Matrix Composite (CMC) Thermal Protection Systems (TPS) and Hot Structures for Hypersonic Vehicles.*
22. R. TINO-RAMOS, *Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio*, pp 42-52, (2010).
23. D. ESCUDERO LÓPEZ. *Composites Materials. Applications* (2001).

24. A. CONTRERAS, E. BEDOLLA, Fabricación y caracterización de materiales compuestos de matriz metálica Al-Cu y Al-Mg reforzados con partículas de TiC. Tesis de Doctorado (2004)
25. Y. ILODY G., Nuevos materiales compuestos de matriz polimérica utilizados en la fabricación de sellos mecánicos, IBEROMET (2006).
26. R. GARCÍA H. Unión de materiales compuestos del tipo Al(1010)/TiC_p(51%), por medio del proceso de soldadura MIG, con arco eléctrico indirecto. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Querétaro (2002).
27. M. J. LU, S. KOU. Power input in gas metal arc welding of Aluminum, part 1. Welding Journal (1989).
28. Y. S. KIM, D. M MCELIGOT, T. W. EAGAR, Analysis of electrode heat transfer in gas metal arc welding. Welding Journal. (1991).
29. I. AGUIRRE. Análisis de las variables en el proceso de soldadura MIG/MAG. Universidad del Valle, Bolivia.
30. Sunarc, Tecnología en soldadura, <http://www.esmijovi.com/wp-content/uploads/2009/10/soldadura-MIG.pdf>, consultado en septiembre de 2011.
31. R. GARCÍA, J. VILLALÓN, E. BEDOLLA, A. MANZANO. Simulación del proceso de soldadura MIG de arco eléctrico indirecto y oculto por medio de la transferencia de calor aplicando el método de elemento finito. VII International Conference on Advanced Materials, August (2001).
32. R. GARCÍA, J. VILLALÓN, E. BEDOLLA, A. MANZANO. Simulación y modelado del proceso de soldadura MIG de arco eléctrico indirecto y oculto por medio de la transferencia de calor aplicando el método de elemento finito. XII Congreso Nacional de Soldadura, Noviembre (2010).
33. R. GARCÍA, J. VILLALÓN, E. BEDOLLA, A. MANZANO. Soldadura de Al 1010 aplicando la técnica de arco eléctrico indirecto y oculto por medio del proceso de soldadura MIG.
34. J. VILLALÓN, R. GARCÍA, E. BEDOLLA, A. MANZANO, Modelado y simulación de la soldadura de materiales compuestos de matriz metálica TiC/Al (51%) y Al₂O₃/Al (20%) aplicando la técnica de arco eléctrico indirecto y oculto por medio del proceso de soldadura MIG. IX Simposium la investigación y el desarrollo tecnológico de Michoacán, Diciembre de (2001).
35. R. GARCÍA, J. VILLALÓN, E. BEDOLLA, A. MANZANO. Implementación de una nueva técnica de unión de aceros al carbono A-36 para espesores de 12.5 mm, con el proceso MIG con arco eléctrico indirecto. Memorias del Encuentro Internacional de Soldadura Industrial. Saltillo, Coah., México (2001) p. 227.
36. R.R. AMBRIZ, G. BARRERA, R. GARCÍA, V.H. LÓPEZ. Eficiencia térmica en soldadura de la aleación Al6061-T6 por arco eléctrico indirecto modificado y digitalización de señales de intensidad de corriente.
37. R. AMBRIZ, G. BARRERA, R. GARCÍA Y V. H. LÓPEZ. Efecto de los ciclos térmicos de soldadura por arco eléctrico indirecto modificado (AEIM) en las propiedades mecánicas de la aleación Al6061-T6.
38. M. A. KOTHARY, Welding of cast A359/SiC/10p Metal Matrix Composites. Thesis, Master of Science, Texas A&M University. August (2005).
39. T. ISEKI, T. KAMEDA, T. MARUYAMA. Interfacial reactions between SiC and aluminum during joining. J. of Mat Sci 19, 1984 (1692-1698)

40. J-C. VIALA, P. FORTIER, B. BONNETOT, J. BOUIX. High pressure between solid aluminum and SiC. Mater. Res. Bull., Vol 21, No. 4, pp (387-394), abril 1986.
41. D. J. LLOYD. The solidification microstructures of particulate reinforced Al/SiC composites. Sci. and tech., 35, (159-179).
42. G. CAROTENUTO, A. GALLO, L. NICOLAS. Degradation of SiC particles in aluminum-based composites. J. of mat. sci. 29. 1994. (4967-4974)
43. R. Y. LIN. The effect of processing time and temperature on the Interfacial reaction of Al/SiC composite. Dept. of Mats. Scie. And engineering, Univ. of Cincinnati, 1989. (110-115)
44. J.-C. LEE, S. B. PARK, H. K. SEOK, S. OH, H. I. LEE. Prediction of Si contents to suppress the interfacial reaction in the SiCp/2014 Al composite. Acta mater Vol 46, No. 8, 1998 (pp 2365-2643).
45. F. BONOLLO, A. TIZIANI, M. PENASA. CO₂ laser welding of aluminum matrix composites. Int. J. of mat. Prod. tech. Vol 17. Nos 3/4, 2002 (291-302).
46. J. H. DEVLETIAN. SiC/Al metal matrix composites welding by a capacitor discharge process. AWS 68th annual meeting. Welding J., 66, 1987 (33-39).
47. C. D. LUNDIN, J. C. DANKO, C. J. SWINDEMAN. Fusion welding of SiC-reinforced aluminum alloy 2024. Conf. Proc. Of recent trends in welding science and technology. 1990. (303-307).
48. M. J. COLA, T. J. LIENERT, J. E. GOULD, J. P. HURLEY. Laser welding of a SiC particulate reinforced aluminum metal matrix composites. Weldability of materials, proc. Mat. Welding symp. 1990 (297-303).
49. A. UREÑA, J. M. GOMEZ DE SALAZAR. Bonding of aluminum matrix composites for application in the transport industry. J. Phys. IV. Vol 3. 1993. (1037-1042).
50. X. P. ZHANG, G.F. QUAN, W. WEI. Preliminary investigation on joining performance of SiC_p-reinforced aluminum metal matrix composites (Al/SiC_p-MMC) by vacuum brazing. Composites part A 30. 1999. (823-827).
51. J. HUANG, Y. WAN, H. ZHANG. TPL bonding of SiCp/2618Al composites used mixed Al-Ag-Cu system powders as interlayers. J. Mat. Sci. DOI 10.1007/s10853-007-2016-9. (2007).
52. J. H. HUANG, Y. L. DONG, Y. WAN, X. K. ZHAO, H. ZHANG. Investigation of reactive diffusion bonding of SiCp/6063 MMC by using mixed powders as interlayers. J. of mats. Proc. Tech., 190 (2007) 312-316.
53. D. STORJOHANN, O. M. BARABASH, S. S. BABU, S. A. DAVID, P. S. SKLAD, E.E. BLOOM. Fusion and friction stir welding of aluminum-metal-matrix-composites. Metallurgical and materials transactions. Nov. 2005. 36A, 11. Pro-quest science journal. (3237-3247)
54. R. GARCIA and V. H. LOPEZ, J. Mat. Sci. (2006).
55. C. NATIVIDAD, M. SALAZAR, R. GARCIA, J. G. GONZALEZ-RODRIGUEZ and R. PEREZ, Corrosion Eng. Sci. Technol. 41 (2006) 91.
56. B. ALTSHULLER, W. CHRISTY and B. WISKEL, in Weldability of materials, Detroit, Michigan, USA, 1990, edited by R. A. Patterson and K. W. Mahin (ASM International, 1990) 305.
57. S. GOWRI and F. H. SAMUEL, Metall. Trans. A 23A (1992) 3369.