



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLAS HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALURGICAS

DEPARTAMENTO DE SOLDADURA

**“OPTIMIZACION DEL CORDON EN UNA SOLDADURA DE FILETE DE
UNA ALEACION DE ALUMINIO PARA APLICACIONES
AUTOMOTRICES”.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN METALURGIA Y CIENCIAS DE LOS MATERIALES

PRESENTA:

ING. GERARDO ALTAMIRANO GUERRERO

ASESOR:

Dr. CUAUHEMOC MALDONADO ZEPEDA

MORELIA, MICH. FEBRERO DE 2009

INDICE

RESUMEN.....	1
INTRODUCCION	2
JUSTIFICACION.....	5
OBJETIVOS.....	6
HIPOTESIS.....	7
CAPITULO I REVISION BIBLIOGRAFICA	8
1.1 ESTADO DEL ARTE.....	9
1.2 EL ALUMINIO PURO COMERCIAL.....	16
1.2.1 Propiedades físicas	16
1.2.2 Propiedades químicas.....	17
1.2.3 Propiedades mecánicas.....	18
1.3 ALEACIONES DE ALUMINIO	18
1.3.1 Efecto de los Elementos de Aleación en el Aluminio.....	19
1.4 ESPECIFICACION DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO FORJADO	20
1.4.1 Designación del estado de tratamiento de la aleación.....	21
1.4.1.1 Sistema Básico	21
1.4.2.2 Sistema de Endurecido por Deformación.....	22
1.4.2.3 Sistema de Ciclos Térmicos de Solución	22
1.5 ALEACIONES ALUMINIO-MAGNESIO-SILICIO (SERIE 6XXX).....	23
1.6 SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.....	26
1.6.1 Efecto de la capa de oxido de aluminio (Al ₂ O ₃).....	27
1.6.2 Efecto del tipo de corriente y polaridad	28
1.6.3 Efecto del proceso de soldadura.....	29
1.7 PROCESO DE SOLDADURA GMAW.....	30
1.7.1 Ventajas, limitaciones y aplicaciones del proceso	31
1.7.2 Equipo necesario para el proceso GMAW	32
1.8 VARIABLES OPERATIVAS DEL PROCESO DE SOLDADURA GMAW.....	34
1.8.1 Corriente de soldadura	34
1.8.2 Polaridad.....	37
1.8.2.1 Polaridad inversa.....	37
1.8.2.2 Polaridad directa.....	38
1.8.3 Voltaje de arco (longitud de arco).....	39
1.8.4 Velocidad de avance.....	42
1.8.5 Extensión libre del electrodo.....	43
1.8.6 Orientación del electrodo	44
1.8.7. Tamaño del electrodo.....	46
1.8.8 Gas de protección	48
1.8.9 Mecanismos de transferencia de metal.....	51
1.8.9.1 Transferencia por corto circuito	51

1.8.9.2	Transferencia globular.....	52
1.8.9.3	Transferencia por spray.....	53
1.8.9.4	Transferencia por corriente pulsada.....	54
1.9	Tipos de juntas.....	56
1.10	TIPOS DE SOLDADURA.....	57
1.10.1	Soldadura de filete.....	57
1.11	DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	59
1.11.1	Diseño de experimentos factorial.....	60
CAPITULO II DESARROLLO EXPERIMENTAL.....		62
2.1	ANALISIS DE LA PIEZA AUTOMOTRIZ.....	63
2.2	CARACTERIZACION DE LA ALEACION DE ALUMINIO 6061-T6.....	64
2.2.1	Análisis metalográfico.....	64
2.2.2	Análisis químico del material base.....	64
2.2.3	Microdureza del material base.....	65
2.2.4	Ensayo de tensión.....	65
2.3	PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.....	67
2.3.1	Preparación de las placas a unir.....	67
2.3.2	Selección del material de aporte.....	68
2.3.3	Selección del gas de protección.....	68
2.3.4	Equipo de soldadura utilizado.....	68
2.3.5	Parámetros de soldadura.....	70
2.4	SELECCIÓN DEL TIPO DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	70
2.4.1	Variables de entrada del diseño de experimentos.....	71
2.4.2	Variables de respuesta del diseño de experimentos.....	72
2.4.3	Matriz experimental: diseño factorial 3 ³	73
2.4.4	Obtención de los resultados (variables dependientes).....	74
2.5	ANÁLISIS DE LAS FRACTURAS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).....	76
2.6	MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA.....	76
CAPITULO III ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.....		77
3.1	ANÁLISIS DE LA PIEZA AUTOMOTRIZ.....	78
3.1.1	Composición química.....	78
3.1.2	Microestructura.....	78
3.1.3	Análisis del cordón de soldadura.....	79
3.2	CARACTERIZACIÓN DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6.....	81
3.2.1	Análisis químico.....	81
3.2.2	Microestructura.....	82
3.2.3	Microdureza.....	82
3.3	ANALISIS DE LAS UNIONES SOLDADAS.....	83
3.3.1	Inspección visual.....	83
3.3.2	Inspección con líquidos penetrantes.....	87
3.3.3	Matriz de experimentos: diseño factorial 3 ³	88
3.3.3.1	Análisis del aporte térmico.....	89
3.3.3.2	Comportamiento de la convexidad del cordón.....	90
3.3.3.2	Comportamiento del ancho del cordón.....	93

3.3.3.3	Análisis de la penetración de la soldadura	98
3.3.3.4	Análisis microestructural de las uniones soldadas	100
3.3.3.5	Análisis de microdureza de las uniones soldadas.....	106
3.3.3.6	Propiedades mecánicas del material base y uniones soldadas	109
3.3.3.7	Análisis de las fracturas mediante MEB	113
CAPITULO IV CONCLUSIONES		120
RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS.....		122
REFERENCIAS		123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Secuencia de precipitación en las aleaciones aluminio- magnesio-silicio.....	24
Figura 1.2.	Diagrama binario Al- Mg ₂ Si	25
Figura 1.3	Porción del diagrama ternario Al-Mg-Si	26
Figura 1.4	Variación del aporte térmico con la densidad de potencia de la fuente de calor.	29
Figura 1.5	Proceso de soldadura GMAW	30
Figura 1.6	Equipo necesario para el proceso de soldadura GMAW	33
Figura 1.7	Característica de la fuente para el proceso GMAW	33
Figura 1.8.	Relación entre la corriente de soldadura y la velocidad de alimentación del alambre para electrodos de aluminio (ER 4043).....	35
Figura 1.9	Efecto de diferentes amperajes en el cordón de soldadura, a) 100A, b) 150 A y c) 200 A.....	37
Figura 1.10.	Uso de la polaridad inversa en soldadura del aluminio	38
Figura 1.11.	Uso de la polaridad directa en soldadura del aluminio	39
Figura 1.12	Efecto de un arco demasiado corto	39
Figura 1.13	Terminología del proceso de soldadura GMAW	40
Figura 1.14	Efecto del voltaje en el tamaño y forma del cordón de soldadura: a) 21 volts, b) 24 volts y c) 27 volts	41
Figura 1.15	Efecto de la velocidad de avance en el cordón de soldadura, a) velocidad de avance demasiado baja, b) velocidad de avance correcta.	42
Figura 1.16.	Efecto de diferentes longitudes libres del electrodo sobre el cordón de soldadura ...	43
Figura 1.17	Muestra los ángulos de trabajo para dos tipos de soldaduras, a) Soldadura a tope, b) Soldadura de filete.....	44

Figura 1.18 Efecto de la posición del electrodo y la técnica de soldadura sobre el cordón.....	45
Figura 1.19 Contorno y penetración del cordón de soldadura con diferentes gases protectores. ..	49
Figura 1.20 Mecanismos de transferencia del metal	51
Figura 1.21 Transferencia por corto circuito con sus rangos promedios de voltajes y amperajes	52
Figura 1.22 Transferencia globular con sus voltajes e intensidades promedios	53
Figura 1.23 Transferencia por spray con sus voltajes e intensidades promedios para su obtención	54
Figura 1.24. Características de la transferencia por corriente pulsada de soldadura	55
Figura 1.25 Efecto de los parámetros operacionales del proceso en el cordón soldadura	56
Figura 1.26 Tipos de juntas	56
Figura 1.27 Soldaduras de filete: a) Traslape, b) En “T” y c) En esquina.	57
Figura 1.28 Terminología de una soldadura de filete.....	58
Figura 1.29 Perfiles de soldaduras de filete, a) Perfiles deseables y b) Perfiles aceptables.	58
Figura 1.30 Defectos típicos en soldaduras de filete, a) Garganta insuficiente, b) Convexidad excesiva, c) Socavado excesivo, d) Solapes, e) Lado insuficiente y f) Fusión incompleta.	59
Figura 2.1 Piezas de aluminio suministradas para su estudio	63
Figura 2.2 Microdurómetro digital utilizado.....	65
Figura 2.3 Maquina universal de tensión utilizada	66
Figura 2.4 Diagrama de las probetas para el ensayo de tensión.....	66
Figura 2.5 Preparación de las placas a unir.....	67
Figura 2.6 Diseño de placas que actuaron como base de las juntas a unir.....	67
Figura 2.7 Fuente de potencia utilizada	69
Figura 2.8 Antorcha de soldadura utilizada	69
Figura 2.9 Angulo de trabajo de 40°	71
Figura 2.10 Angulo de trabajo de 45°	72
Figura 2.11 Angulo de trabajo de 50°	72
Figura 2.12 Variables del cordón de soldadura analizadas, 1: ancho, 2: convexidad y 3: profundidad de penetración.....	75
Figura 2.13 Ubicación de los termopares.....	76
Figura 3.1 Micrografía obtenida de la pieza automotriz	78
Figura 3.2 Seccionamiento de la piezas	79
Figura 3.3 Macrografía del corón de soldadura	80
Figura 3.4 Porosidad presente en el cordón de soldadura	81
Figura 3.5 Microestructura de la aleación de aluminio 6061-T6	82

Figura 3.6 Apariencia superficial de placa soldada con ángulo de 40°, 5.5 mm/s y 180A.....	83
Figura 3.7 Perfil transversal del cordón de soldadura obtenido con 40°, 5.5 cm/min y 180A	84
Figura 3.8 Acabado superficilal de la soldadura realizada con angulo de 40°, 5.5 mm/s y 150A.	84
Figura 3.9 Perfil transversal de unión realizada con 40°, 150 A y 5.5 mm/s.....	84
Figura 3.10 Apariencia del cordón en unión realizada con ángulo de 45°, 150 A y 4.5 mm/s.....	85
Figura 3.11 Perfil del cordón obtenido con 45°, 150 A y 4.5 mm/s.	85
Figura 3.12 Apariencia de una soldadura obtenida con un ángulo de 50°, 150 A y 30 cm/min. ...	86
Figura 3.13 Corte transversal del cordón de soldadura obtenido con un ángulo de 50°, 150 A y 30 cm/min.....	86
Figura 3.14 Defectos superficiales de uniones realizadas con 120 A.	87
Figura 3.15 Calidad del cordón en uniones realizadas con altos aportes	88
Figura 3.16 Efecto de la variables de entrada del diseño experimental sobre el aporte térmico ...	89
Figura 3-17 Contornos de superficie de respuesta estimada para el aporte térmico	90
Figura 3.17 Comportamiento de cada factor sobre la convexidad del cordón de soldadura.....	91
Figura 3.18 Contornos de superficie de respuesta estimada para la convexidad del cordón	92
Figura 3.19 Efecto del aporte térmico en la convexidad del cordón.....	92
Figura 3.20 Comportamiento individual de las variables de entrada sobre en ancho del cordón..	94
Figura 3.21 Contornos de superficie de respuesta estimada para el ancho de cordón	95
Figura 3.21 Efecto del aporte térmico en el ancho del cordón, a) 441.6 J/mm y b) 736 J/mm	95
Figura 3.22 Relación entre el aporte térmico y el ancho del cordón para un ángulo de 40°	96
Figura 3.23 Relación entre el aporte térmico y el ancho del cordón para un angulo de 40°	96
Figura 3.24 Relación entre el aporte térmico y el ancho del cordón para un angulo de 40°.....	97
Figura 3.25 Comportamiento individual de las variables operativas sobre la penetración del cordón.....	98
Figura 3.26 Contornos de superficie de respuesta estimada para el ancho de cordón	99
Figura 3.27 Microestructura de unión soldada de la aleación de aluminio 6061-T6.....	101
Figura 3.28 Microestructura del centro del cordón	102
Figura 3.29 Zonas de análisis de la microestructura	102
Figura 3.30 Microestructura de la unión realizada con 736 J/mm, a) zona central del cordón y b) zona lateral.	103
Figura 3.31 Microestructura de la unión realizada con un aporte térmico de 555 J/mm, a) zona central del cordón y b) zona lateral.	104
Figura 3.32 Microestructura de la unión realizada con un aporte térmico de 401.4 J/mm, a) zona central del cordón y b) zona lateral.	105

Figura 3.33 Zonas de mediciones de la microdureza	106
Figura 3.34 Perfiles de microdureza obtenidos para un aporte de 736 J/mm	107
Figura 3.35 Perfiles de microdureza obtenidos para un aporte de 555 J/mm	108
Figura 3.36 Perfiles de microdureza obtenidos para un aporte de 401.45 J/mm	109
Figura 3.37 Probetas fracturadas de soldaduras realizadas con un ángulo de 40°	111
Figura 3.38 Probetas fracturadas de soldaduras realizadas con un ángulo de 45°	112
Figura 3.39 Probetas fracturadas de soldaduras realizadas con un ángulo de 45°	113
Figura 3.40 Fractura del material base (100x)	114
Figura 3.41 Fractura del material base (1000x)	114
Por otro lado, al fondo de las cavidades de la superficie de fractura se observó un número considerable de intermetálicos de forma cilíndrica, los cuales han sido reportados con una longitud aproximada de 4 a 5 μm y un diámetro de 1 a 1.5 μm (Ref. 3), y a los cuales se le realizó un microanálisis que dio como resultado la presencia de la matriz de aluminio, Magnesio y pequeñas cantidades de Silicio y Carbono, ver figura 3.42.	115
Figura 3.42 Análisis de la fractura del MB	115
Figura 3.43 Fractura de la soldadura, a) 401.4 J/mm, b) 736 J/mm.....	116
Figura 3.44 Análisis de la superficie de fractura de las soldaduras	117
Figura 3.45 Microanálisis de la superficie de fractura de las soldaduras.....	118

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Relación de propiedades físicas más relevantes del aluminio puro.	17
Tabla 1.2 Relación de propiedades mecánicas más relevantes del aluminio puro.....	18
Tabla 1.3 Solubilidad solida de los principales elementos de aleación en el aluminio.....	19
Tabla 1.4 Sistema de designación para las aleaciones de aluminio forjado.....	21
Tabla 1.5. Soluciones químicas para eliminar óxidos antes de soldar	28
Tabla 1.6 Procesos de soldadura recomendados para las aleaciones de aluminio en base a su espesor.	30
Tabla 1.7 Corrientes de soldadura recomendadas para algunos electrodos de aluminio	36
Tabla 1.8 Valores de voltajes de arco típicos para el proceso GMAW para diferentes materiales	41
Tabla 1.9 Composición química de electrodos de aluminio más utilizados	47
Tabla 1.10. Selección de los metales de aporte para la soldadura del aluminio y sus aleaciones..	47

Tabla 1.11 Flujos de gas recomendados para la soldadura del aluminio y sus aleaciones.	50
Tabla 1.12 Especificaciones para la convexidad del cordón en soldaduras de filete.....	59
Tabla 2.1 Composición química de la aleación de aluminio 6061-T6.....	64
Tabla 2.2 Composición química del material de aporte ER4043.....	68
Tabla 2.3 Características físicas del argón	68
Tabla 2.4 Parámetros de soldadura	70
Tabla 2.5 Variables de entrada del diseño de experimentos	71
Tabla 2.6 Variables de respuesta del diseño de experimentos	73
Tabla 2.7 Matriz experimental	74
Tabla 3.1 Composición química de la pieza automotriz	78
Tabla 3.2 Variables de la geometría del cordón medidas	80
Tabla 3.3 Composición química de la aleación 6061-T6.....	81
Tabla 3.4 Microdureza del material base	82
Tabla 3.5 Matriz experimental resultante.....	88
Tabla 3.6 Optimización del diseño experimental para minimizar la convexidad del cordón	93
Tabla 3.7 Condiciones para minimizar el ancho del cordón.....	97
Tabla 3.8 Condiciones para maximizar el ancho del cordón de soldadura	97
Tabla 3.9 Optimización del diseño experimental para la penetración del cordón	100
Tabla 3.10 Propiedades mecánicas obtenidas del material base	109
Tabla 3.11 Resultados de las soldaduras ensayadas.....	110

RESUMEN

En los últimos años el uso de aleaciones de aluminio en componentes automotrices ha aumentado dramáticamente, pero la soldadura de este material es complicada y la industria encuentra algunos problemas para obtener uniones libres de defectos, ya sea porque no se cuenta con un procedimiento adecuado de soldeo o porque se dejan pasar ciertas consideraciones, las cuales están en función de las características físicas, químicas y metalúrgicas del propio material, y que son muy importantes para lograr una buena unión.

En el presente trabajo de investigación se muestra el efecto de los parámetros de soldadura (intensidad de corriente, velocidad de avance y ángulo de trabajo), sobre la geometría del cordón (ancho, altura y penetración), y el comportamiento mecánico y metalúrgico de la unión. Dicho estudio nace a partir del análisis minucioso realizado a la soldadura de filete de una pieza automotriz de aluminio enviada al departamento de soldadura para su estudio, donde se encontró que la unión presenta problemas de convexidad excesiva o exceso de material depositado, fusión incompleta, falta penetración y demasiada porosidad. Por lo tanto, se procedió a la determinación de los parámetros de soldadura para la obtención de una óptima geometría del cordón, para lo cual se utilizó una técnica de diseño de experimentos factorial 3^3 .

Se realizaron un total de 27 pruebas de soldadura con la variación de dichos parámetros operacionales de acuerdo al diseño de experimentos seleccionado. Las soldaduras se realizaron sobre juntas a traslape de una aleación de aluminio 6061-T6 (Al-Mg-Si), utilizando un electrodo ER-4043 (Al-5%Si), mediante el proceso de arco metálico con protección gaseosa (GMAW). El procesamiento de los datos y obtención de los resultados de acuerdo al diseño de experimentos se realizó mediante el programa estadístico STATGRAPHIS plus 4.1. Se logró establecer el comportamiento y la relación existente entre el ancho del cordón, altura o convexidad y la penetración, en función de los parámetros operacionales y logrando con ello, establecer las condiciones apropiadas para lograr una óptima geometría del cordón en una soldadura de filete de una aleación de aluminio. El estudio de las juntas soldadas se realizó mediante técnicas de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y ensayos mecánicos.

INTRODUCCION

El aluminio es un metal ligero, muy resistente a la corrosión, de elevada conductividad calorífica y eléctrica, muy maquinable y moldeable; posee muchas otras propiedades de gran importancia en la civilización moderna. Sin duda, es el metal, después del acero, que se utiliza con mayor frecuencia. Inicialmente se utilizaba aluminio casi puro, cuya aplicación industrial es muy reducida. Posteriormente se descubrió que, aleándolo con otros elementos, mejoraban sus propiedades o se ampliaban sus características, fabricándose en consecuencia aleaciones diversas para numerosos fines especiales.

Actualmente existen una gran variedad de aleaciones de aluminio, dentro de las cuales se encuentran las aleaciones ternarias Al-Mg-Si (serie 6XXX), las cuales son de las aleaciones de aluminio tratables térmicamente más frecuentemente utilizadas. Estas aleaciones no tienen la misma resistencia mecánica que las series 2XXX (Al-Cu) y 7XXX (Al-Zn), lo cual hace que sean útiles en aplicaciones donde la resistencia requerida no sea demasiado alta. El silicio (Si) imparte elevada fluidez y el magnesio aumenta la resistencia mecánica. El mecanismo por el cual la resistencia se incrementa es la formación de precipitados de tipo coherente con la matriz de aluminio. El precipitado encargado de aumentar la dureza es el Mg_2Si (siliciuro magnésico) (Ref. 30, 37). Entre las aleaciones de la serie 6XXX está la 6061-T6, que presenta un contenido de Si entre 0.4 y 0.8 % en peso y Mg en un rango de 0.8 a 1.2 %. La secuencia de precipitación reportada para estas aleaciones es: *SSS* \rightarrow *grupos independientes de átomos de Si y Mg* \rightarrow *grupos de átomos que contienen Mg y Si* \rightarrow *pequeños precipitados de estructura desconocida* \rightarrow *precipitados β''* \rightarrow *precipitados β'* \rightarrow *precipitados β* . (Ref. 8, 39).

El incremento en la resistencia mecánica de una aleación como consecuencia de la precipitación de partículas a partir de una solución solidada sobresaturada, durante el tratamiento térmico posterior al temple, se conoce como endurecimiento por precipitación o endurecimiento por envejecimiento. En este sentido, es ampliamente conocido que cuando dicho tratamiento da lugar a la formación de una dispersión uniforme de partículas finas, se obtiene la mejor combinación de propiedades mecánicas, mientras que si tales partículas se hacen más gruesas o si precipitan en el límite de grano dichas propiedades se degradan. (Ref. 40).

Las aleaciones del sistema Al-Mg-Si constituyen uno de los tipos de aleaciones de aluminio susceptibles de endurecerse por precipitación, aspecto que es aprovechado en aplicaciones que involucran el uso de estos materiales como elementos estructurales, empleos en los cuales los diseños flexibles duraderos y de bajo peso representan características importantes. Por otra parte, el proceso de extrusión hace de este tipo de aleaciones un fuerte competidor de las estructuras construidas a partir de chapas de acero conformadas en frío y soldadas, ya que el perfil extruido puede integrar diversas funciones lo cual reduciría el número de piezas y la cantidad de maquinado y ensamblaje.

Por lo tanto, en los últimos años se ha visto una tendencia importante hacia el reemplazo del acero por este tipo de aleaciones de aluminio, particularmente en aplicaciones donde el bajo peso es importante, tal como en la industria del transporte terrestre, marítimo, aeronáutico y aeroespacial. En todos los casos, la soldadura es el primer método de unión utilizado. Sin embargo, ya que tales empleos implican la existencia de solicitaciones estáticas y dinámicas, es de fundamental importancia el estudio no solo del comportamiento metalúrgico de la unión soldada sino también de los parámetros operacionales que conllevan a la optimización de la geometría del cordón de soldadura, puesto que se ha reportado que determinadas formas geométricas del cordón afectan el comportamiento mecánico de la unión soldada. (Ref. 40, 44).

La geometría del cordón de soldadura en el proceso de arco metálico con protección gaseosa, al igual que en otros procesos, es un factor muy importante en la determinación de las características mecánicas de la soldadura. Variables de la geometría del cordón tales como ancho, altura y profundidad de penetración, están fuertemente influenciadas por los parámetros operacionales incluyendo la corriente de soldadura, el voltaje, la velocidad de avance, el gas de protección, entre los más importantes (Ref. 17, 18, 19, 22, 23). En recientes años, una gran cantidad de investigaciones se han llevado a cabo para estudiar el efecto de los parámetros de soldadura sobre la geometría del cordón utilizando diferentes tecnologías. (Ref. 17, 18, 19, 22).

La selección correcta de los parámetros del proceso es requerida para obtener una geometría del cordón óptima, la cual, como ya se mencionó, tiene una influencia muy grande en la calidad de la unión. Sin embargo, se requiere de una gran cantidad de pruebas y personal experimentado para determinar los parámetros óptimos de soldadura. Por lo tanto, se requiere de un método más eficiente para la determinación de dichos parámetros.

Las técnicas de diseño de experimentos se basan en estudiar simultáneamente los efectos de todos los factores de interés, las cuales son más eficaces y proporcionan mejores resultados a un menor costo. El diseño estadístico de experimentos contempla una amplia variedad de estrategias experimentales que son óptimas para generar la información que se busca. Los diseños de experimentos son ampliamente utilizados en numerosas investigaciones en el campo de la soldadura, lográndose resultados satisfactorios con un número reducido de pruebas experimentales y gastos mínimos de recursos. (Ref. 27, 28).

Bajo la premisa de que “Un cordón con buena apariencia es un factor que todos los fabricantes desean conservar” en la presente investigación se hace uso de una técnica de diseño de experimentos factorial para la optimización de los parámetros operacionales y por ende de la geometría del cordón, en una soldadura de filete de una aleación de aluminio.

JUSTIFICACION

1. En los últimos años el uso de aleaciones de aluminio en componentes para automóviles ha aumentado considerablemente. La necesidad de la industria automotriz de obtener uniones soldadas que cumplan con los requerimientos de calidad especificados por los diferentes códigos de soldadura, es la razón principal del objeto del presente estudio.
2. La mayor parte de los estudios realizados con el objetivo de optimizar la forma geométrica del cordón de soldadura consideran a la intensidad de corriente y la velocidad de avance de la soldadura como los parámetros de mayor importancia. Para llegar a obtener una óptima geometría del cordón de soldadura, en la presente investigación se incluye al ángulo de trabajo como otra variable importante sobre la calidad final del cordón de soldadura.

OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo es:

1. Mediante una técnica de diseño de experimentos factorial, optimizar los parámetros del proceso de soldadura GMAW para producir un filete con una geometría tal que no afecte las propiedades mecánicas de la unión soldada

Los objetivos específicos que se persiguen son los siguientes:

2. Establecer el comportamiento y la relación existente entre el ancho del cordón, altura o convexidad y penetración, en función de la intensidad de corriente, velocidad de avance y ángulo de trabajo.
3. Comparar las microestructuras y propiedades mecánicas de los distintos perfiles de soldadura obtenidos con los diferentes parámetros utilizados.
4. Desarrollar una técnica y un procedimiento de soldadura que reduzca los defectos encontrados en la pieza automotriz y que tenga aplicación industrial.

HIPOTESIS

Para el objetivo 1 se considera la siguiente hipótesis:

1. Los parámetros de soldadura que tienen mayor efecto en el tamaño, forma, y por ende en la calidad final del cordón de soldadura de filete son: la intensidad de corriente, la velocidad de avance y el ángulo de trabajo. El ángulo de trabajo con el que mejores perfiles se obtienen es de 45°.

Para los objetivos 2 y 3 se consideran las siguientes hipótesis:

2. Un aumento o disminución de la velocidad de avance, modifica el grado de penetración, ancho del cordón y su forma geométrica. La intensidad de corriente es directamente proporcional a la profundidad de penetración de soldadura. El efecto del ángulo de trabajo sobre el ancho y la penetración del cordón, se considera mayor que el efecto de la intensidad de corriente y velocidad de avance.
3. Un cordón de soldadura con exceso de material depositado produce una zona afectada térmicamente (ZAT) más amplia y suave. Por lo tanto, reduciendo la altura o convexidad del cordón, se mejoran las propiedades mecánicas de la unión.
4. Existe un menor crecimiento de grano en los perfiles de soldadura realizados con mayor aporte térmico, y por el contrario la cantidad de poros atrapados en el metal de soldadura es menor.

Para el objetivo 4 se considera la siguiente hipótesis:

5. Para una soldadura de filete en juntas a traslape de una aleación de aluminio de $\frac{1}{4}$ in de espesor se debe utilizar un rango de intensidad de corriente de 150 a 180 amperes, una velocidad de avance entre 4.5 y 5.5 mm/s, la mayor calidad del cordón de soldadura se consigue empleando una técnica de arrastre con un ángulo de 45° con respecto a la vertical.

CAPITULO I REVISION BIBLIOGRAFICA

1.1 ESTADO DEL ARTE

Como ya se ha comentado, la soldabilidad del aluminio y, en especial, sus aleaciones tratables térmicamente, no es tan satisfactoria como la del acero, como consecuencia de las características inherentes al metal, que hacen de su soldadura una técnica distinta a la de los metales ferrosos. La porosidad, fisuración en caliente y sobrevejecimiento son problemas típicos en la soldadura de aleaciones de aluminio tratables térmicamente y en algunas no tratables.

Las aleaciones de aluminio han sido ampliamente estudiadas en cuanto a problemas de soldabilidad se refiere. J.L. Murphy y colaboradores, realizaron un estudio sobre el origen y control de la porosidad en la soldadura de una aleación de aluminio 5083. De acuerdo con estos autores, el grado de porosidad presente en uniones soldadas de aluminio depende de manera importante de la preparación de juntas, es decir, de la limpieza de las partes a unir. Estos investigadores compararon tres métodos de limpieza aplicados sobre la superficie de una aleación de aluminio 5083 antes de la ejecución de la soldadura. Reportando que con la técnica de limpieza con herramientas de diamante se obtienen uniones con menor cantidad de poros en comparación con las soldaduras en las cuales se realizó una limpieza con cepillo de alambre de acero inoxidable y otra con un solvente químico. Los mejores resultados los atribuyen a que por medio de la limpieza mecánica con herramientas de diamante se obtiene una superficie más fina y lisa con una menor área expuesta a contaminantes. (Ref.4).

Por otro lado, se ha demostrado que el uso de argón puro como gas de protección produce mayor número de porosidades que el usar una mezcla de 25% argón más 75% helio. (Ref. 5).

Otro problema fuerte en la soldadura de las aleaciones de aluminio es la fisuración en caliente. En ese sentido E. Cicala y colaboradores, realizaron un estudio sobre dicha problemática en aleaciones de Al-Mg-Si, en específico la aleación 6056-T4. Según estos investigadores, los parámetros que tienen una influencia importante en el grado de agrietamiento en caliente son la velocidad de desplazamiento, velocidad de alimentación y tipo del material de aporte, velocidad de flujo y tipo de gas de protección. Además de algunos factores operativos como el tipo de boquilla de contacto, proceso de soldadura, apertura de raíz entre las placas, entre otros. Después

de elaborado el estudio, determinaron una ventana o rango de parámetros de gran aplicación industrial con los cuales se logra disminuir la susceptibilidad del agrietamiento en caliente durante la ejecución de la soldadura (Ref. 6).

Por su parte V. Malin, estudió el fenómeno de sobre-envejecimiento que ocurre en las aleaciones de aluminio después de soldadas. Para lo cual, realizó la caracterización del cordón de soldadura y la zona afectada térmicamente (ZAT) en una aleación de aluminio 6061 –T6 soldada con el proceso GMAW con corriente pulsada y un material de aporte 4043 (Al- 5%Si). Encontrando una pequeña zona en la ZAT donde la dureza disminuía considerablemente y precisamente donde el material fracturaba durante el ensayo de tensión. De acuerdo con Malin, esta zona de dureza mínima se debe al crecimiento de la fase β'' y aparición de la fase β' (sobre-envejecimiento), la cual aparece a 380°C. Reportando además, que el rango de precipitación para la más efectiva resistencia de la fase β'' se presenta entre 160 y 240 °C. Por otro lado, observó un marcado decremento de dureza inmediatamente después de la zona fundida y especuló que esto fue causado por la migración de magnesio a la pileta de soldadura. (Ref. 7).

Para minimizar el problema de sobre-envejecimiento en la ZAT de las aleaciones de aluminio, L. Bertini y colaboradores investigaron el comportamiento que resulta de hacer tratamientos térmicos post-soldadura en una aleación de aluminio 6063, la cual fue posteriormente evaluada bajo ensayos de fatiga.. Todas las uniones soldadas fueron sometidas a diferentes condiciones de fatiga, con el fin de determinar el efecto que se tiene con los diferentes tratamientos térmicos post-soldadura, encontrando que aunque se logra un incremento en las propiedades mecánicas después de solubilizar y envejecer artificialmente, el incremento en la resistencia a la fatiga no es muy notable. (Ref. 9).

J.C. Rangel y colaboradores, estudiaron la modificación de las propiedades mecánicas y la evolución a nivel microestructural de una aleación de aluminio 6061-T6 soldada con el proceso de arco metálico y protección gaseosa (GMAW), y tratada por solución cuatro años después de una maduración natural. Encontraron que los mínimos de dureza en el material envejecido tanto natural como artificialmente sufren desplazamiento transversal alejándose del cordón de soldadura con respecto a la junta no envejecida. En general, reportan un notorio incremento en las

propiedades mecánicas de la unión soldada para los dos tipos de envejecimiento. Los incrementos mayores se observaron en las soldaduras hechas con menor aporte térmico y, asocian la menor respuesta de recuperación al mayor ancho de la zona afectada por el calor que presentaron las uniones realizadas con mayor aporte térmico, a la menor densidad de precipitados finos endurecedores y mayor cantidad de precipitados gruesos. (Ref. 10).

En la soldadura del aluminio y sus aleaciones al igual que en otros materiales, la calidad final de la unión soldada depende de una gran cantidad de factores tales como el proceso de soldadura utilizado, tipo de material de aporte y gas de protección, tipo de aleación y su estado de tratamiento térmico, tratamientos térmicos después de la soldadura, etc. Por tal motivo una gran cantidad de investigadores han realizado estudios sobre las diferencias encontradas en uniones soldadas bajo diferentes condiciones. Tal es el caso de V. Balasubramanian y colaboradores, quienes reportaron el efecto del tipo de corriente, proceso de soldadura y tratamiento térmico de envejecimiento artificial post-soldadura sobre la microestructura y propiedades mecánicas en la unión de una aleación de aluminio 7075. El esfuerzo de fluencia y esfuerzo máximo reportado para el material base antes de la soldadura fue de 417 y 520 Mpa, respectivamente. En las soldaduras realizadas con los procesos convencionales GMAW y GTAW las propiedades disminuyeron en un 55% y 48%, respectivamente. Sin embargo, cuando las uniones las realizan con los mismos procesos pero ahora utilizando corriente pulsada las propiedades mejoraron notablemente. Además, mencionan que mediante un tratamiento térmico de envejecimiento artificial post-soldadura las propiedades mecánicas se incrementan hasta en un 10%. (Ref. 11).

Los materiales de aporte comúnmente usados en el soldeo de diversas aleaciones de aluminio, y que son extensamente recomendados y empleados, son ER4043 (Al-5%Si) y el ER5356 (Al-5%Mg). Una creencia errónea es que se pueden soldar exitosamente, casi todas las aleaciones de aluminio con ambos tipos de aporte, pues la mayoría de las recomendaciones para el soldeo de las aleaciones de aluminio las indican como apropiadas. Sin embargo, se han encontrado diferencias significativas en las uniones soldadas con ambos aportes. Tal es el caso de P.P. Lean Sifuentes, quien reporta que el material de aporte ER4043 (Al-5%Si) produce cordones de soldadura de mejor aspecto y acabado superficial, debido a que presenta buena fluidez. Según el autor, el silicio disminuye el punto de fusión de las aleaciones de aluminio, por ello el aporte ER4043

presenta mayor fluidez, lo que produce una mayor penetración. Además, en las uniones soldadas con el aporte ER4043 se observó un mayor crecimiento de grano en la ZAT debido a la difusión preferente del Si en los límites de grano. El cordón realizado con el aporte ER5356 (Al-5%Mg) presenta muchas salpicaduras y mayor rugosidad, y se genera una gran cantidad de gases durante el proceso de soldeo debido al alto porcentaje de magnesio que contiene. Este aporte una vez depositado posee una resistencia mayor que el aporte ER4043. (Ref. 12).

K. Okamoto y colaboradores, realizaron un estudio sobre las propiedades mecánicas y soldabilidad en una unión disímil de chapas de aluminio 5052-H34 y aluminio vaciado A360-F, las cuales fueron unidas con soldadura por fricción con diferentes velocidades de soldadura. Para su análisis, primeramente estudiaron la soldadura en cada aleación por separado y posteriormente realizaron la unión disímil de las dos aleaciones, reportando lo siguiente: La aleación 5052 H-34 muestra menores propiedades de resistencia a la tensión y elongación después de la soldadura y, según los investigadores, la velocidad de soldadura tiene muy poca influencia sobre dichas propiedades. Por el contrario, la resistencia a la tensión en la aleación A360-F, incrementa con altas velocidades de soldadura y, en general, presenta mejores propiedades que el material base. En la unión disímil observaron que la resistencia a la tensión dependía en gran parte de la zona afectada térmicamente en la aleación 5052 H-34 pues era el lugar donde ocurría la fractura. (Ref. 13).

Igualmente C.C. Menzemer y colaboradores, reportaron los resultados de un estudio realizado con el objeto de analizar la microestructura de la zona de fusión en una soldadura de filete de una unión disímil entre una aleación de Al-Mg-Si (6061-T6) y una aleación Al-Mg (5083-H321) soldadas con el proceso GMAW y utilizando un material de aporte 5356 (Al-5%Mg). Las principales observaciones encontradas fueron: crecimiento de grano cerca de la línea de fusión y segregación de partículas de segunda fase en los límites de grano, lo cual atribuyen al calor aportado durante el proceso de soldadura. Además, encontraron una gran cantidad de pequeñas fisuras en la interface cordón de soldadura-metal base 6061-T6, indicando que el calor aportado fue bastante grande pareado con la existencia de tensiones localizadas causadas, según ellos, por la redifusión y distribución no uniforme de partículas de segunda fase. (Ref. 14).

A.K. Lakshminarayanan y colaboradores, evaluaron el efecto de tres diferentes procesos de soldadura (FSW, GMAW Y GTAW), sobre las propiedades mecánicas de una aleación de aluminio 6061. Encontrando que en la soldadura por fricción (FSW) se obtiene un aumento en la resistencia de aproximadamente 34% comparado con la unión realizada con el proceso GMAW y un 15% comparado con la soldadura realizada con GTAW, y esto es principalmente atribuido a la formación de granos equiaxiales mas finos y mas uniformemente distribuidos en el cordón de soldadura en la unión realizada con FSW. Reportando además, que la dureza es menor en el metal de soldadura comparada con la zona afectada térmicamente y el material base, independientemente del proceso de soldadura. (Ref. 15).

Como es bien sabido, las propiedades mecánicas de una unión soldada dependen en gran parte de la microestructura presente en el cordón de soldadura y en la ZAT, es decir, mayor refinamiento de grano mejores propiedades mecánicas y viceversa. En ese sentido R. Manti y colaboradores, realizaron un estudio para ver el efecto de los parámetros de pulso (duración de pulso, corriente pico y frecuencia de pulso), sobre la microestructura y microdureza de una aleación de aluminio 6061-T6 soldada con el proceso de arco de tungsteno y gas (GTAW). Observaron una estructura de grano más fina en la soldadura realizada con arco pulsado en comparación con la realizada con el proceso GTAW convencional (sin pulsación de arco). En opinión de los citados autores, la frecuencia de pulso es directamente proporcional al refinamiento de grano, es decir, a mayor frecuencia de pulso mayor refinamiento de grano. El efecto de dicha frecuencia sobre la microestructura está determinado por la duración de pulso. Además, incrementando el pico de corriente se incrementa el tamaño de grano. En general, el refinamiento de grano con arco pulsado lo atribuyen a tres cosas: menor calor aportado, mayor turbulencia de la piqueta de soldadura y un mayor número de nucleantes producidos. (Ref. 16).

La geometría del cordón juega un importante rol en las propiedades mecánicas finales de la unión soldada. Variables de la geometría del cordón, tales como, ancho del cordón, altura y profundidad de penetración, están fuertemente correlacionadas a los parámetros operacionales del proceso incluyendo corriente de soldadura, voltaje, velocidad de avance, gas de protección y distancia entre el tubo de contacto y la pieza de trabajo, entre otros. Por tal motivo, es muy importante la

selección correcta de estos parámetros de soldadura para poder lograr una unión de calidad. En ese sentido Y.S. Tarnng y W.H. Yang, aplicaron el método Taguchi para la optimización de la geometría de un cordón de soldadura realizado con GTAW. Estos investigadores demostraron que el método taguchi provee una sistemática y eficiente metodología para encontrar los parámetros de soldadura idóneos para una geometría del cordón deseada. Durante su estudio encontraron que los parámetros de soldadura que tienen mayor influencia sobre la morfología del cordón son la velocidad de avance de la soldadura, intensidad de corriente y la polaridad. Reportando que el ancho del cordón, penetración y el tamaño del refuerzo son mejormente controlados mediante el uso de este método. (Ref. 17).

I.S. Kim y colaboradores, desarrollaron un sistema inteligente para seleccionar los parámetros óptimos de soldadura sobre una geometría del cordón dada. El sistema desarrollado está integrado por un modelo de red neuronal y dos modelos de regresión múltiple para la predicción de la geometría del cordón incluyendo el ancho, altura, profundidad de penetración, área de penetración, área total del cordón y dilución. De acuerdo con estos autores, la corriente de soldadura, el voltaje y la velocidad de avance son las variables del proceso que tienen mayor influencia sobre el tamaño y forma del cordón de soldadura. El sistema desarrollado permite la entrada de las dimensiones de la soldadura deseadas y la selección de los parámetros óptimos para tales dimensiones. (Ref. 18).

Así mismo P.E. Murray, desarrolló un método para seleccionar los parámetros de soldadura para un cordón deseado. Estableció una relación analítica entre los parámetros de soldadura y las variables del proceso GMAW por medio de un análisis dimensional y de regresión de datos experimentales obtenidos después de una gran cantidad de pruebas de soldadura en las cuales los parámetros de soldadura fueron precisamente controlados y las variables del proceso precisamente medidas y correlacionadas. Obteniendo relaciones analíticas exactas entre los parámetros de soldadura, variables del proceso y geometría del cordón y, encontrando un rango de parámetros específicos que aseguraban un tamaño ideal de cordón de soldadura y una adecuada penetración. (Ref. 19).

A su vez D.S. Nagesh y G.L. Datta, realizaron un estudio con el objeto de predecir la geometría del cordón de soldadura y penetración a través del uso de redes neuronales para un proceso de soldadura de arco eléctrico y electrodo revestido. Observando que con elevadas velocidades de avance de la soldadura y bajas intensidades de arco, normalmente se produce una pobre fusión, y que los parámetros que tienen mayor influencia sobre la penetración de la soldadura son el voltaje, la intensidad de corriente y la velocidad de desplazamiento. El uso de un modelo de red neuronal les permitió predecir las características de la geometría del cordón y la penetración. Los resultados del modelado mostraron una diferencia muy pequeña entre lo estimado y los valores experimentales. (Ref. 22).

J.E. Torres, realizó una investigación con el objetivo de optimizar un procedimiento de soldadura GMAW para una aleación de Al-Mg-Si a través del control del calor suministrado. Para lograr tal objetivo, este autor estudió minuciosamente el efecto del control del calor de aporte a través de los parámetros operacionales y la aplicación de tratamientos térmicos posteriores a la soldadura de pletinas de aluminio 6061-T6. Haciendo una evaluación de los niveles de precipitación, coherente e incoherente, mediante microscopía electrónica de transmisión y óptica y respaldada por un análisis térmico diferencial de los fenómenos metalúrgicos y la variación de las propiedades mecánicas que se generaron en la ZAT, zona fundida y zona de transición. Mediante el cálculo por elementos finitos, obtuvo la modelización de los ciclos térmicos, generados por la soldadura de la aleación de aluminio, lográndose predicciones con márgenes de desviación del 3%. (Ref. 20).

A su vez C.A. Bloem, realizó un estudio donde aborda la evaluación y modelización del comportamiento a la fatiga de varias uniones soldadas de aluminio 7020 mediante el proceso GMAW, considerando variables de presoldeo a la corriente de soldadura, velocidad de avance y voltaje y el estado de tratamiento de la aleación. Como variables posteriores a la soldadura consideró un tratamiento térmico de envejecimiento artificial y dos acabados mecánicos sobre la morfología del cordón de soldadura, una eliminando por completo el refuerzo o sobremonta del cordón mediante un amolado y otra suavizándolo sin llegar a eliminarlo por completo. En general, reporta mejores resultados en las uniones sometidas a tratamiento térmico post-soldadura y con eliminación completa del refuerzo del cordón. Proponiendo un modelo matemático que se

ajusta a los datos experimentales obtenidos para predecir el comportamiento a la fatiga de uniones soldadas de aluminio en función de los parámetros de soldadura, estado metalúrgico de la aleación y la morfología del cordón. (Ref. 21).

Por otro lado J.R. Flores, estudió el efecto del aporte térmico sobre las propiedades de la unión soldada de un acero inoxidable 304 mediante el proceso GMAW, utilizando una técnica de diseño de experimentos. Considerando como variables independientes a la intensidad de corriente y velocidad de avance, y dentro de las variables de respuesta consideró un coeficiente de forma del refuerzo del cordón de soldadura, el cual está dado en función del ancho y altura del refuerzo. Dicho coeficiente representa la geometría del cordón de soldadura. Logrando predecir cuál será el coeficiente de forma del cordón para un valor dado de intensidad de corriente y velocidad de avance. (Ref. 23).

1.2 EL ALUMINIO PURO COMERCIAL

El aluminio puro es un metal blando y ligero, muy resistente a la corrosión, de alta conductividad calorífica y eléctrica, muy maquinable y moldeable; posee muchas otras propiedades de gran importancia en la civilización moderna y se utiliza en muchas aplicaciones en las que no se desea una resistencia mecánica muy alta. Se consigue en formas producidas por *extrusión o por laminado* y puede *endurecerse o templarse* por trabajo en frío, pero no por tratamiento térmico. Las aleaciones de aluminio poseen mejores características para ser fundidas y maquinadas y mejores propiedades mecánicas y, por lo tanto, se emplean en mayor extensión que el metal puro.

1.2.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas más destacables del aluminio y sus aleaciones son su elevada conductividad térmica y eléctrica y su baja densidad. En la tabla 1 se presenta un resumen de las propiedades físicas características del aluminio puro. Evidentemente, algunas de estas propiedades varían según el contenido en impurezas. (Ref. 30).

Tabla 1.1. Relación de propiedades físicas más relevantes del aluminio puro.

Propiedad Característica	Valor
Color	Blanco
Estructura cristalográfica	FCC (cubica centrada en las caras)
Parámetro reticular (20 °C)	0,40414 nm
Densidad (20 °C)	2,699 g/cm ³
Cambio volumétrico durante la solidificación	6,7%
Calor de combustión	200 kcal/(atm·g)
Punto de fusión	660,2°C
Punto de ebullición	2057 - 2480°C
Calor específico (20 °C)	930 J
Coefficiente lineal de expansión térmico *10 ⁶	23,0 (20 - 100°C)
Conductividad eléctrica (valor máximo)	34 - 38 m/(Ω·mm ²)
Conductividad térmica	80 - 230 W/(m·K)
Resistividad eléctrica	2,69 μΩ·cm
Susceptibilidad magnética (18 °C) (*10 ⁶)	0.63

1.2.2 Propiedades químicas

Tanto el aluminio puro como sus aleaciones presentan una gran resistencia a la corrosión debido a la formación de una capa fina y adherente de entre 4 y 5 μm de espesor de óxido de aluminio o alúmina (Al₂O₃) sobre la superficie del metal. Esta capa de óxido constituye una película impermeable que impide la difusión del oxígeno hacia el metal base, haciendo al aluminio y sus aleaciones muy resistentes a la corrosión. Además puede ser anodizado, pintado o recubierto, para mejorar las propiedades anticorrosivas.

Si en determinadas aplicaciones industriales se necesita una mayor resistencia a la corrosión, ésta se puede conseguir aumentando el espesor de la capa artificialmente mediante un procedimiento electroquímico llamado anodización. (Ref. 34).

El ácido clorhídrico, fluorhídrico y sulfúrico concentrado pueden atacar fácilmente al aluminio y a sus aleaciones, mientras que en soluciones de ácido nítrico, amoníaco y en la mayoría de ácidos orgánicos reacciona ligeramente. La resistencia química del aluminio depende de la composición química y concentración de la solución así como de la pureza del metal.

1.2.3 Propiedades mecánicas

En cuanto a resistencia, se puede decir que la resistencia a la tracción del aluminio puro es de aproximadamente 90 Mpa. Sin embargo, se pueden aumentar sustancialmente estos valores con la adición de algunos elementos aleantes, o por medio de un trabajado en frío.

El módulo de elasticidad del aluminio es, también, relativamente bajo y muy sensible al porcentaje de impurezas. En la tabla 1.2 se detallan las propiedades estructurales más características del aluminio puro. (Ref. 30).

Tabla 1.2 Relación de propiedades mecánicas más relevantes del aluminio puro

Modulo de elasticidad (grado de pureza: 99.99%)	$64 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$
Modulo de elasticidad (grado de pureza: 99.95%)	$69 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$
Modulo de rigidez (G)	$17 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$
Coefficiente de Poisson	0.32-0.34

1.3 ALEACIONES DE ALUMINIO

Las propiedades del aluminio dependen de un conjunto de factores, de estos, el más importante es la existencia de aleantes. Con la excepción del aluminio de alta pureza (99,99 % de pureza), industrialmente se utilizan sólo materiales de aluminio que contienen otros elementos. Aún en el aluminio de alta pureza, las impurezas (Fe y Si) determinan, en gran medida, sus propiedades mecánicas. Los elementos aleantes principales del aluminio son: Cobre (Cu), Silicio (Si), Magnesio (Mg), Zinc (Zn) y Manganeseo (Mn); en menores cantidades existen, frecuentemente, como impurezas o aditivos: Hierro (Fe), Cromo (Cr) y Titanio (Ti). Para aleaciones especiales se adiciona: Níquel (Ni), Cobalto (Co), Plata (Ag), Litio (Li), Vanadio (V), Circonio (Zr), Estaño (Sn), Plomo (Pb), Cadmio (Cd) y Bismuto (Bi). (Ref.2, 30 y 37).

Se han diseñado un gran número de aleaciones de aluminio para satisfacer necesidades específicas, las cuales están dentro de una serie de normas internacionales que especifican sus composiciones y propiedades mecánicas

1.3.1 Efecto de los Elementos de Aleación en el Aluminio

Como ya se mencionó, los principales elementos de aleación usados comercialmente para el aluminio son el cobre (Cu), silicio (Si), magnesio (Mg), zinc (Zn) y el manganeso (Mn). Las propiedades físicas como la densidad, el rango de temperatura de fusión, el coeficiente de expansión térmica y las conductividades térmica y eléctrica se ven modificadas por uno o más elementos de aleación. En cuanto a las propiedades químicas como la resistencia a la corrosión, los elementos que mejoran la resistencia son el Cr, Mg y Mn y elementos como el Cu, Ni, Sn, Pb y Co son perjudiciales. En diversos medios agresivos la resistencia a la corrosión de las aleaciones de aluminio se incrementa en la medida que aumenta la pureza del aluminio, aunque también influyen la cantidad y distribución de las segundas fases y la naturaleza de la solución sólida. (Ref.33)

Todos los elementos aleantes principales presentan una gran solubilidad en el aluminio y en todos los casos la solubilidad aumenta con la temperatura. El Cinc es el elemento que presenta una mayor solubilidad. En general, la máxima solubilidad se consigue a las temperaturas correspondientes al eutéctico, peritético o monotético. El descenso de la solubilidad con la temperatura es la base para tratamientos de solubilización y envejecimiento de estas aleaciones.

En la tabla 1.3 se presenta la solubilidad sólida en el aluminio de los principales elementos de aleación. Los elementos que presentan una solubilidad sólida mayor al 1% en el aluminio son los siguientes: Ag, Cu, Ga, Ge, Li, Mg, Mn, Si y Zn; de los cuales Ag, Ga, Ge son muy caros y el Li presenta dificultades en su procesamiento.

Tabla 1.3 Solubilidad sólida de los principales elementos de aleación en el aluminio

Elemento	Solubilidad Líquida % Peso	Solubilidad Sólida % Peso	Temperatura Reacción Eutéctica °C
Cu	33.15	5.67	550
Mg	35	14.9	450
Mn	1.95	1.82	660
Si	12.6	1.65	580
Zn	95	82.8	380

Silicio (Si). El efecto sobresaliente del Si en las aleaciones de aluminio es que mejora las propiedades del material para ser fundido. Adiciones de Si al aluminio puro mejoran dramáticamente la fluidez y la resistencia en caliente. Los contenidos de este elemento en las aleaciones de aluminio pueden ir desde porcentajes bajos (< 1%) hasta el 25%.

Cobre (Cu). Generalmente los porcentajes de cobre en el aluminio van del 1 al 10%. Mejora substancialmente la resistencia y la dureza en las condiciones de “tal cual se fabricó” y tratado térmicamente. Aleaciones que contienen del 4 al 6% son más efectivas para el tratamiento térmico. El cobre reduce la resistencia a la corrosión del aluminio.

Magnesio (Mg). Es la base para el desarrollo de la resistencia y la dureza en las aleaciones de aluminio tratadas térmicamente que contienen porcentajes de silicio y cobre, debido a que aumenta el endurecimiento por precipitación y aumenta la carga de rotura por tensión. No obstante, si se adiciona más del 0.15% disminuye el alargamiento y la fluidez.

1.4 ESPECIFICACION DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO FORJADO

Las aleaciones de aluminio para *forja* (prensadas, laminadas, extruídas) son clasificadas de acuerdo con los elementos aleantes principales que contenga la aleación. Para identificar las aleaciones de aluminio forjado la asociación internacional de aluminio adoptó una designación numérica de cuatro dígitos, tal como se muestra en la tabla 1.4, donde el primer dígito identifica el grupo o serie de acuerdo al elemento en mayor proporción (con excepción de la serie 6xxx, donde el Mg y el Si son ambos predominantes); el segundo dígito indica una modificación a la aleación, siendo el “0” (cero) para la aleación original y los números del 1 al 9 expresan distintas modificaciones de la aleación. En el grupo 1XXX se designa para un aluminio con una pureza del 99% o mayor, los dos últimos dígitos señalan el porcentaje adicional en centésimas mínimo del aluminio. Por ejemplo, la designación 1060 indica un material en el cual la pureza del aluminio es 99.60%. En los grupos 2XXX al 8XXX los dos últimos dígitos no tienen un significado especial, sirven únicamente para identificar una aleación particular del grupo. (Ref. 30).

Tabla 1.4 Sistema de designación para las aleaciones de aluminio forjado

Principal Elemento de Aleación	Designación de Aleación No.
99.00% de grado de pureza o mayor	1XXX
Cobre	2XXX
Manganeso	3XXX
Silicio	4XXX
Magnesio	5XXX
Magnesio-Silicio	6XXX
Cinc	7XXX
Otros elementos	8XXX
Serie no utilizada	9XXX

Dentro de las aleaciones no tratables térmicamente se encuentran las series 1xxx, 3xxx y 5xxx, mientras que las series 2xxx, 6xxx y 7xxx, pertenecen al grupo de las aleaciones tratables térmicamente.

1.4.1 Designación del estado de tratamiento de la aleación

La Asociación de Aluminio adoptó un sistema de designación para que después del tipo de aleación, esté la interpretación del estado del material, bien sea esto, aluminio fundido o forjado. Este sistema consiste en describir la serie de tratamientos fundamentales utilizados para conseguir los estados de tratamiento de los materiales. Según este sistema, los distintos tratamientos básicos se indican mediante una letra, seguida por uno o más dígitos, salvo en los estados de recocido y de bruto, que no van seguidos por ninguno. (Ref. 30, 37).

1.4.1.1 Sistema Básico

F.- tal como se fabrica: Aplicado a productos fundidos y conformados en caliente o en frío donde no hubo control especial sobre las condiciones del proceso.

O.- Recocido: Aplicado a aquellos productos que son recocidos para obtener propiedades de ductilidad y estabilidad dimensional.

H.- Endurecido en estado de acritud o por deformación en frío. Se aplica a los materiales cuyas características mecánicas mejoran al someterse a una deformación en frío.

W.- Tratamiento Térmico de Solución: Aplicable solo a las aleaciones que envejecen espontáneamente a temperatura ambiente después de un tratamiento térmico de solución.

T.- Tratado Térmicamente: Se aplica a los productos que son tratados térmicamente para obtener estados estables con o sin endurecimiento por deformación en frío posterior.

1.4.2.2 Sistema de Endurecido por Deformación

H1.- Estado de acritud solamente.

H2.- Indica el estado de un material obtenido por acritud y recocido después parcialmente.

H3.- Estado obtenido por acritud y estabilizado a continuación.

1.4.2.3 Sistema de Ciclos Térmicos de Solución

T1.- Enfriado desde temperatura elevada de un proceso de conformado y envejecido naturalmente hasta un estado de condición estable. Se aplica a los productos que no son deformados en frío.

T2.- Enfriado desde temperatura elevada de un proceso de conformado, deformado en frío, y envejecido naturalmente hasta un estado de condición estable. Se aplica a los productos que no son deformados en frío para no promover endurecimiento después del enfriamiento desde temperatura elevada.

T3.- Sometido a un tratamiento térmico de solubilización, deformado en frío, y envejecido naturalmente hasta un estado de condición estable. Se aplica a los productos que son deformados en frío para mejorar el endurecimiento después del tratamiento térmico de solubilización.

T4.- Sometido a un tratamiento térmico de solubilización y envejecido naturalmente hasta un estado de condición estable. Se aplica a los productos que no son deformados en frío después de un tratamiento térmico de Solubilización.

T5.- Enfriado desde elevada temperatura de un proceso de conformado y después envejecido artificialmente. Se aplica a los productos que no son deformados en frío después de un proceso de conformado.

T6.- Sometido a un tratamiento térmico de solubilización y después envejecido artificialmente. Se aplica a los productos que no son deformados en frío después de un tratamiento térmico de Solubilización.

T7.- Sometido a un tratamiento térmico de solubilización y estabilizado. Se aplica a los productos que son estabilizados después del tratamiento de solubilización para llevarlos más allá de su punto máximo de endurecimiento para proveer el control alguna característica en especial.

T8.- Sometido a un tratamiento térmico de Solubilización, deformado en frío, y después envejecido artificialmente. Se aplica a los productos que son deformados en frío para mejorar su endurecimiento.

T9.- Sometido a un tratamiento térmico de solubilización, envejecido artificialmente, y después deformado en frío. Se aplica a los productos que son deformados en frío para mejorar sus propiedades.

T10.- Enfriado desde elevada temperatura de un proceso de conformado, deformado en frío, y después envejecido artificialmente Se aplica a los productos que son deformados en frío para mejorar sus propiedades mecánicas.

1.5 ALEACIONES ALUMINIO-MAGNESIO-SILICIO (SERIE 6XXX)

Las aleaciones de la serie 6XXX contienen silicio y magnesio en la proporción requerida para la formación del compuesto Mg_2Si (siliciuro magnésico). La formación de este compuesto provee a las aleaciones de aluminio que pertenecen a esta familia el que sean tratables térmicamente. Aunque no tienen la misma resistencia mecánica que las series 2XXX (Al-Cu) y 7XXX (Al-Zn), estas aleaciones tienen buena conformabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión. Además, se pueden extrudar (proceso tecnológico que consiste en dar forma o moldear una masa haciéndola salir por una abertura especialmente dispuesta para conseguir perfiles de diseño complicado), fácil y económicamente, por esta razón, las encontramos en una gran variedad de formas extrudadas. Algunas de sus aplicaciones incluyen, componentes para automóviles, barcos y aviones, armazón de bicicletas, andamios, pasamanos, y muchas otras aplicaciones estructurales. (Ref. 30, 37)

Las variantes más importantes de este grupo de aleaciones son Al-Mg-Si0.5, Al-Mg-Si0.7 y Al-Mg-Si1, las cuales pueden endurecer en frío y en caliente. Los máximos valores de resistencia se consiguen en las aleaciones Al-Mg-Si mediante endurecimiento en caliente. Los tratamientos adecuados se realizan entre 520 y 540°C.

La aleación 6061-T6 con la cual se trabajó en este proyecto se encuentra dentro de la familia 6XXX, en donde la fase estable es la fase beta o Mg_2Si . La secuencia de precipitación en estas aleaciones es: $SSS \rightarrow$ grupos independientes de átomos de Si y Mg \rightarrow grupos de átomos que contienen Mg y Si \rightarrow pequeños precipitados de estructura desconocida \rightarrow precipitados $\beta'' \rightarrow$ precipitados $\beta' \rightarrow$ precipitados β . En la Figura 1.1 se muestra una representación esquemática de la evolución de estos precipitados desde las estructuras GP hasta las condiciones de equilibrio.

La composición química y la estructura cristalográfica de numerosas fases de transición están aún por conocer en muchos sistemas. En el sistema que nos ocupa, el mecanismo de precipitación tiene lugar por germinación y crecimiento. (Ref.39).

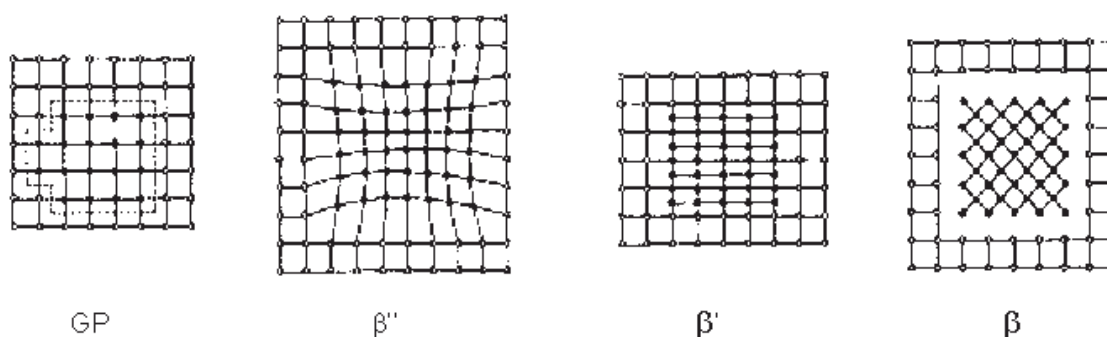


Figura 1.1. Secuencia de precipitación en las aleaciones aluminio- magnesio-silicio

Las zonas GP (agrupaciones de átomos de la misma naturaleza), son reportadas como esféricas, la fase β' en forma de barra y la fase β'' en forma de aguja. Los racimos de magnesio forman racimos Mg-Si de relación atómica 1:1, una vez envejecida esta aleación, la relación cambia a 1.6:1, lo que indica que se acerca al valor de equilibrio de 2:1 después de un tratamiento de envejecimiento artificial prolongado. Por esta razón, reportan la importancia de estos racimos o grupos iniciales de Mg que se forman a temperatura ambiente en la cinética del envejecimiento artificial. Al tener exceso de Si hace que se reduzca el tiempo necesario para que inicie el reforzamiento, lo cual se debe a que se favorece la formación de precipitados finos uniformemente distribuidos. Además, el exceso de Si reduce la relación Mg/Si. Los núcleos de Si y Los precipitados β se forman por la aparición de racimos de Si y co-racimos de Mg-Si, influyendo de manea diferente el tiempo de envejecido.

Como se mencionó anteriormente, el Si y el Mg se combinan entre sí para formar el compuesto denominado siliciuro magnésico (Mg_2Si), el cual a su vez forma un sistema eutéctico simple con el aluminio. La región rica en aluminio del diagrama de equilibrio correspondiente a este sistema se muestra en la figura 1.2. Estas aleaciones alcanzan su máxima resistencia cuando son sometidas a un envejecimiento artificial (T6), que da lugar a la precipitación del compuesto Mg_2Si . La serie 6XXX está integrada entre otras, por las aleaciones 6053, 6061 y la 6063, en las cuales las cantidades de Mg y Si son suficientes para formar el compuesto Mg_2Si .

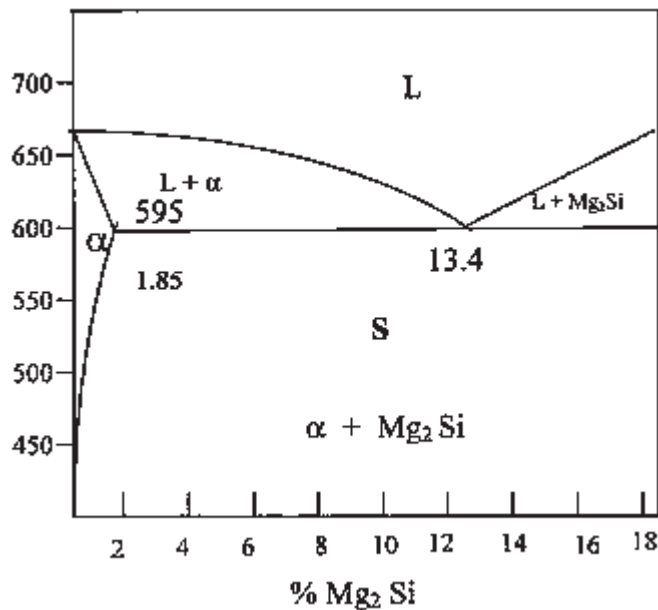


Figura 1.2. Diagrama binario Al- Mg_2Si

La fase α y el constituyente binario Mg_2Si forman un sistema cuasi binario que divide al sistema ternario en dos partes. En el sistema cuasi binario, los dos componentes forman un eutéctico a $595^\circ C$ que contiene 8.15 % de Si y existe una solubilidad del sólido formado en el extremo del aluminio que alcanza un 0.85% de Mg y 1.10% de Si a la temperatura eutéctica. El conocimiento de los límites de solubilidad en este sistema aleado tiene gran importancia. El hecho de que en estado sólido se produzca una notable disminución de la solubilidad del soluto con la temperatura, permite que estas aleaciones sean susceptibles de tratamientos térmicos para mejorar las propiedades mecánicas.

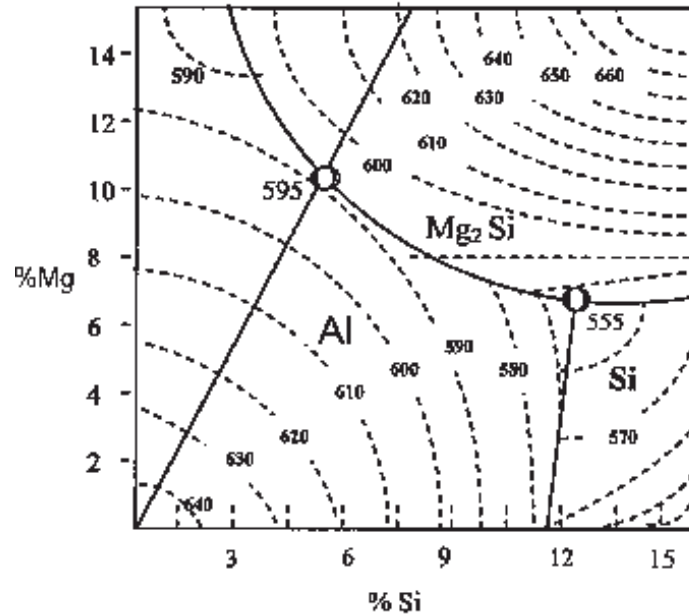


Figura 1.3 Porción del diagrama ternario Al-Mg-Si

El sistema ternario parcial Al-Si-Mg₂Si forma un eutectico ternario que contiene 4.97%Mg, 12.95% de Si y solidifica a 555°C, mientras que el Mg₂Si y el Mg₂Al₃ forman otro a 33.2% de Mg, 0.37% de Si y solidifica a 451 °C, tal como se observa en la figura 1.3. (Ref. 2, 30,37, 39).

1.6 SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

Entre las numerosas y variadas definiciones de *soldabilidad* que suministra la literatura técnica, la más indicada o más completa es la que hace referencia a la capacidad que poseen los materiales metálicos iguales o diferentes entre sí de poder unirse por la acción de calor hasta formar un cuerpo único físicamente continuo y libre de defectos. De acuerdo a la definición anterior, la soldabilidad del aluminio y sus aleaciones se puede considerar como una soldabilidad intermedia, ya que para lograr una buena unión en estos materiales se deben tomar en cuenta muchas consideraciones, las cuales están en función de las propiedades físicas, químicas y metalúrgicas del propio metal, así como algunas otras que dependerán única y exclusivamente de la técnica y proceso de soldadura que se esté utilizando.

1.6.1 Efecto de la capa de oxido de aluminio (Al₂O₃)

La primer dificultad que se presenta en la soldadura del aluminio y sus aleaciones comienzan con la capa de oxido de aluminio (Al₂O₃) que se forma de manera natural sobre la superficie del metal, la cual tiene un espesor aproximado de 4 a 5 X 10⁻⁶ mm y funde por encima de los 2000°C. Durante el proceso de soldadura, dicha capa de oxido impide la estabilidad del arco eléctrico entre el electrodo y el metal base cuando se está utilizando corriente directa con polaridad directa (CDEN), al igual que el uso de la corriente alterna normal. Por todo esto, es muy importante la limpieza de las juntas a unir antes de empezar el proceso de soldadura. Existen diferente técnicas para eliminar el oxido o suciedades de la superficie del aluminio y su utilización dependerá de los resultados que se persiguen. (Ref. 1, 2,3, 29 y 34).

- **Preparación manual.**- Como su nombre lo indica, la limpieza se hace manualmente. Para eliminar los óxidos de aluminio, se utiliza un cepillo de alambre de acero inoxidable o disolventes y soluciones decapantes. Si se utiliza un cepillo de acero inoxidable, se debe cepillar solo en una dirección. Se debe tener cuidado de no cepillar demasiado enérgicamente, ya que pueden incrustarse los óxidos en la pieza, además, se recomienda no limpiar la superficie de aluminio con un cepillo que haya sido utilizado para otros materiales, pues se podría contaminar el aluminio. Por otro lado, la limpieza de las partes a unir también se puede realizar por medio de soluciones químicas decapantes, la técnica consiste en sumergir las piezas en una determina solución y por un determinado tiempo, posteriormente las piezas se lavan perfectamente con agua y se dejan secar. En la tabla 1.5 se muestran algunas soluciones químicas que pueden ser utilizados para la eliminación de óxidos antes de la soldadura.
- **Preparación Mecánica.**- En esta técnica, como su nombre lo indica, la limpieza de las partes a unir se hace por medios mecánicos. El grado de mecanización permite la utilización de estos métodos en la producción seriada. Se recomienda la preparación y limpieza de la superficie del aluminio con herramientas de diamante, ya que es la forma que deja una superficie más fina y de menor área expuesta a los contaminantes. (Ref.4).

Tabla 1.5. Soluciones químicas para eliminar óxidos antes de soldar

Tipo de solución	Concentración	Temperatura °C	Medio de preparación	Proceso	Propósito
Hidróxido de sodio	50 g hidróxido de sodio por litro de agua	60-71	Acero al carbono	Sumergir por 10 a 60 seg., después enjuagar en agua fría	Elimina óxidos gruesos
Acido sulfúrico	156 g de acido sulfúrico por litro de agua	93	Polietileno	Sumergir por 5 a 10 seg., después enjuagar en agua fría primero y después en agua tibia, secar	Elimina óxidos
Sulfato ferroso	10 % del volumen de agua	Ambiente	Polietileno	Sumergir por 5 a 10 seg., después enjuagar en agua fría primero y después en agua tibia, secar	Elimina óxidos

1.6.2 Efecto del tipo de corriente y polaridad

La soldabilidad del aluminio y sus aleaciones depende en gran medida de la selección correcta del tipo de corriente y polaridad. Como ya se explicó anteriormente, debido a la capa de óxido que posee el metal en la superficie, no se recomienda bajo ninguna circunstancia el uso de corriente alterna o el uso de corriente directa con polaridad directa, por no lograr conseguir una estabilidad del arco eléctrico. Por lo tanto, para la soldadura del aluminio y sus aleaciones se debe emplear siempre corriente directa con polaridad inversa (CDEN), es decir, el electrodo conectado al polo positivo de la fuente y la pieza de trabajo al polo negativo. Empleando la polaridad inversa, se logra eliminar la capa de óxido de aluminio y permitiendo así la ejecución de la soldadura. En esencia existen tres factores con los que se trata de explicar este fenómeno. (Ref. 1)

1. Bombardeo iónico sobre el material base
2. Emisión electrónica del material base
3. Rompimiento y disociación de la película de óxido refractario.

En el apartado de parámetros de soldadura se explicará un poco más a detalle el término de polaridad.

1.6.3 Efecto del proceso de soldadura

Como se ha visto hasta el momento, en la soldadura del aluminio y las aleaciones a base de aluminio, el proceso de soldadura tiene un efecto importante en la calidad final de la unión. La geometría y tamaño del cordón de soldadura, el tamaño de la zona afectada térmicamente (ZAT) y el grado de distorsión de la pieza, dependen en gran medida del proceso de soldadura utilizado. Debido a las propiedades físicas propias del aluminio tales como su elevada conductividad térmica y baja densidad, se recomienda el uso de procesos de soldadura de alta concentración de energía, que no utilicen fundentes y con una protección de gas inerte. El uso o selección adecuada del proceso de soldadura dependerá entre otros factores, del espesor de material base.

En la figura 1.4 se presentan las características de diferentes procesos de soldadura en base al aporte térmico y la densidad de potencia de la fuente de calor. (Ref. 29 y 40).

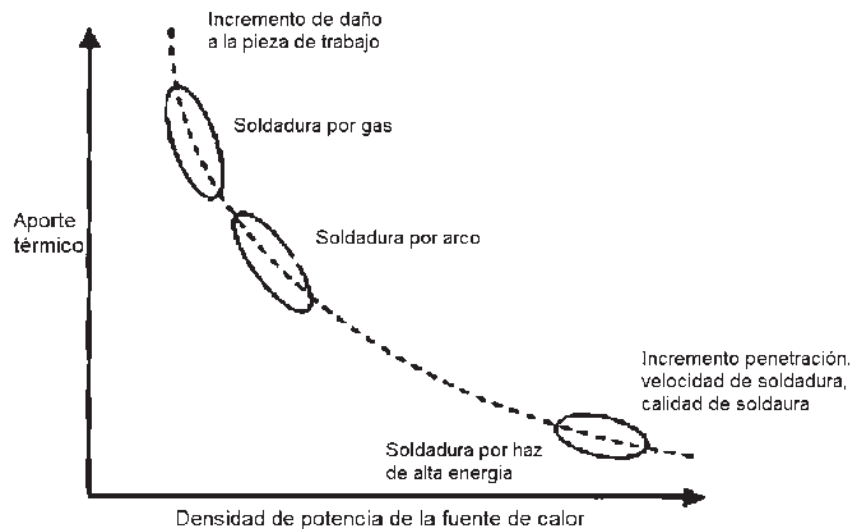


Figura 1.4 Variación del aporte térmico con la densidad de potencia de la fuente de calor.

Como resultado del análisis de los procesos de soldadura aplicables para unir el aluminio y sus aleaciones, se presenta la tabla 1.6 considerando los espesores del material base a unir. (Ref. 2).

Tabla 1.6 Procesos de soldadura recomendados para las aleaciones de aluminio en base a su espesor.

MATERIAL	ESPESORES	GMAW	GTAW	PAW	OFW	EBW	LBW
ALEACIONES DE ALUMINIO	3 mm	X	X	X	X	X	X
	3-6 mm	X	X	X		X	X
	6 – 19 mm	X				X	
	mayores	X				X	

1.7 PROCESO DE SOLDADURA GMAW

El proceso de soldadura de arco metálico con protección de gas (Gas Metal Arc Welding, GMAW), se basa en un arco eléctrico que surge entre un electrodo sólido que se alimenta automáticamente y el metal base. Dicho proceso se realiza bajo la protección de un gas suministrado externamente, que puede ser inerte (argón y helio), activo (dióxido de carbono, oxígeno y nitrógeno) o de una mezcla de ambos. El intenso calor del arco funde la pieza de trabajo y la punta del electrodo, el cual se trasfiere al metal base en forma continua, lográndose así la coalescencia. En la figura 1.5 se presenta un esquema del proceso de soldadura GMAW. (Ref. 29 y 32).

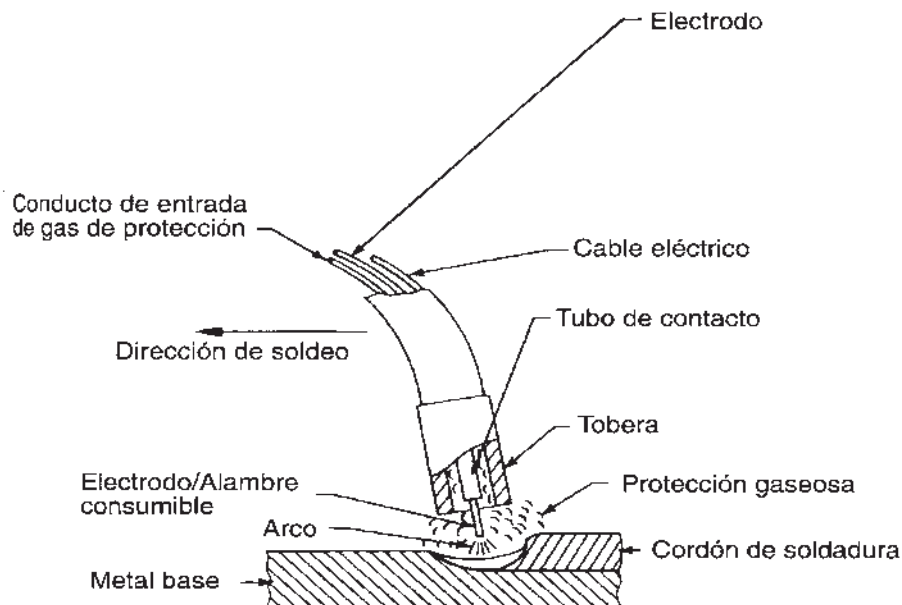


Figura 1.5 Proceso de soldadura GMAW

1.7.1 Ventajas, limitaciones y aplicaciones del proceso

➤ **Ventajas:**

1. Es el único proceso de soldadura por arco con electrodo consumible que puede emplearse para la soldadura de todos los metales y aleaciones comerciales.
2. Permite la soldadura en todas posiciones, lo que no es posible con otros procesos.
3. Comparado con el proceso de arco metálico con electrodo revestido (SMAW), se requiere menor nivel de habilidad por parte del soldador.
4. Comparado con el proceso SMAW y el GTAW (proceso de arco eléctrico con electrodo de tungsteno), se garantizan mucho mayores velocidades de depósito.
5. Se garantizan mayores velocidades de soldadura que con SMAW o GTAW por las mayores velocidades de depósito y la alimentación continua del electrodo.
6. Se depositan costuras largas sin puntos intermedios de inicio y parada.
7. Mínima necesidad de limpieza post-soldeo ya que no se forma una escoria gruesa.
8. Reducción de humos y gases con respecto al proceso SMAW.
9. Gran aprovechamiento del metal de aporte (no hay pérdidas por escoria, colillas, etcétera).
10. Se pueden soldar espesores pequeños (hasta 6 mm) sin necesidad de bisel.
11. Se logra una penetración del arco mayor que con SMAW, sobre todo con la transferencia por spray.

➤ **Limitaciones del proceso:**

1. El equipo es más complejo, más costoso y menos portátil que el de SMAW.
2. La pistola debe estar cerca de la pieza de trabajo, y por lo tanto, el proceso es menos adaptable que el de electrodo recubierto para soldadura en áreas de difícil acceso.

3. En la soldadura de aceros endurecibles, la susceptibilidad al fisuramiento del metal soldado es mayor; debido a que no existe escoria que pueda reducir la velocidad de enfriamiento del cordón.
4. El proceso es menos práctico que el SMAW para soldaduras en exteriores, debido a que el viento puede desviar la atmósfera protectora de la zona de soldadura con la consecuente aparición de defectos.
5. Los relativamente altos niveles de radiación de calor y de intensidad de arco pueden provocar cierto rechazo o resistencia por parte de los soldadores.

➤ **Aplicaciones:**

El proceso GMAW se aplica para la soldadura de todos los metales y aleaciones de mayor comercialización, lo que incluye los aceros al carbono, aleados e inoxidables, los hierros fundidos, las aleaciones base níquel, aluminio y sus aleaciones, magnesio, cobre, titanio y zirconio. En cuanto al rango de espesores se pueden soldar metales desde 0,5 mm de espesor en adelante (hasta un espesor prácticamente ilimitado).

Es un proceso versátil que permite la soldadura en todas las posiciones, seleccionado los parámetros adecuados. Se puede mecanizar, además de que constituye un proceso ideal para aplicaciones robotizadas. Por otro lado, no constituye la mejor selección para la soldadura en exteriores, por los problemas que se pueden presentar con la protección gaseosa.

1.7.2 Equipo necesario para el proceso GMAW

Los componentes básicos para el proceso de soldadura GMAW son la fuente de poder, sistema de alimentación, mecanismo de impulsión del electrodo, sistema de suministro de gas, antorcha o pistola de soldadura, mangueras y cables. El equipo completo se muestra en la figura 1.6

El equipo puede regular automáticamente las características eléctricas del arco, es decir, la longitud del arco eléctrico es regulada por el voltaje de trabajo, y la intensidad de la corriente

eléctrica depende de la velocidad de alimentación del electrodo, por lo tanto, las fuentes de corriente para el proceso de soldadura GMAW deben poseer una característica externa (volt-ampérica) plana o ligeramente ascendente, ver figura 1.7. Estas máquinas se denominan fuentes de voltaje constante.

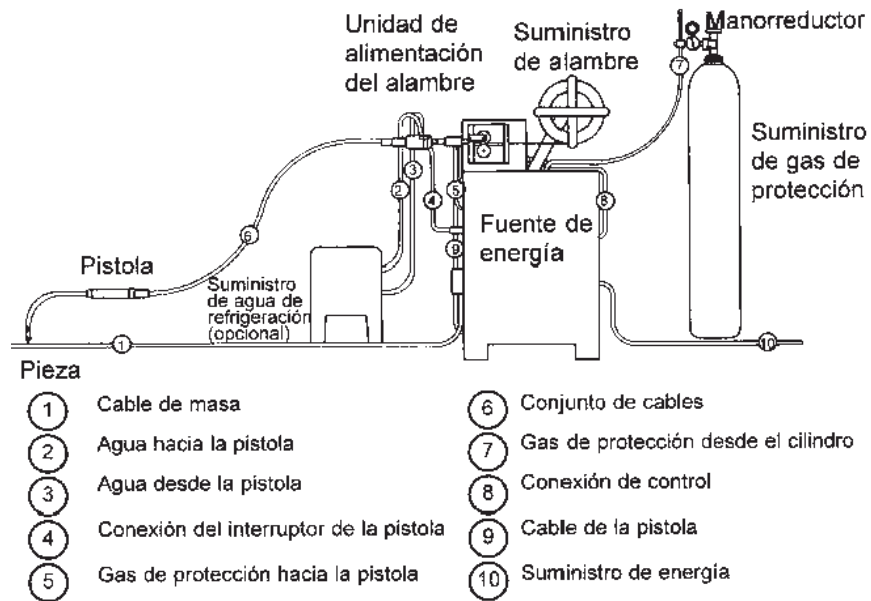


Figura 1.6 Equipo necesario para el proceso de soldadura GMAW

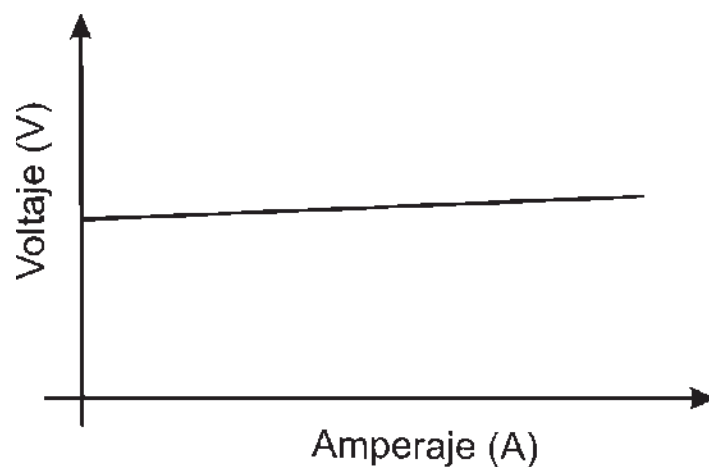


Figura 1.7 Característica de la fuente para el proceso GMAW

1.8 VARIABLES OPERATIVAS DEL PROCESO DE SOLDADURA GMAW

Las siguientes son algunas de las variables del proceso GMAW que afectan la penetración de la soldadura, la geometría y tamaño del cordón y la calidad final del depósito de soldadura en toda su extensión:

1. Corriente de Soldadura (Velocidad de Alimentación del Electrodo)
2. Polaridad
3. Voltaje de Arco (Longitud de Arco)
4. Velocidad de Avance
5. Extensión del Electrodo
6. Orientación del Electrodo (Ángulo de Empuje o Ángulo de Arrastre)
7. Diámetro del Electrodo
8. Gas de Protección

El conocimiento y el control de estas variables son esenciales para la producción de soldaduras consistentes y de una calidad satisfactoria. Estas variables no son completamente independientes y el cambio en el valor de alguna de ellas generalmente requiere un cambio en alguna o en varias de las otras para producir los resultados esperados. Se requiere de habilidad y buena experiencia para seleccionar los valores óptimos de cada una de las variables para una aplicación en particular. Estos valores óptimos están afectados por el tipo de metal base, la composición del electrodo, la posición de soldadura y los requerimientos de calidad. Por lo tanto, no hay un conjunto único de parámetros que proporcione los resultados óptimos en cada uno de los casos.

1.8.1 Corriente de soldadura

Cuando todas las otras variables se mantienen constantes, el amperaje de soldadura varía con la velocidad de alimentación del electrodo o la velocidad de fusión se comporta como una relación no lineal. Cuando la velocidad de alimentación del electrodo se modifica, el amperaje de soldadura varía en forma similar si se está utilizando una fuente de poder de voltaje constante. En la Figura 1.8 se muestra ésta relación entre la corriente de soldadura y la velocidad de

alimentación del alambre para un electrodo ER4043 (Al-5%Si), en la cual se puede observar que para electrodos de diámetro pequeño la relación es casi lineal, sin embargo, para diámetros mayores la relación es no lineal. Esto se atribuye al incremento de resistividad por calentamiento del electrodo en la extensión libre. La curva puede ser representada aproximadamente por la siguiente ecuación 1.1. (Ref. 3, 32).

$$W.F.S = Ai + bLI^2 \text{-----Ec. 1.1}$$

DONDE:

W.F.S = Velocidad de alimentación del electrodo en mm/s

a = Constante de proporcionalidad para el calentamiento anódico catódico. Su magnitud depende de la polaridad, la composición y otros factores y se da en mm/s*A

b = Constante de proporcionalidad para el calentamiento por resistencia eléctrica en S⁻¹A⁻²

L = Extensión libre del electrodo en mm

I = intensidad de corriente en amperes (A)

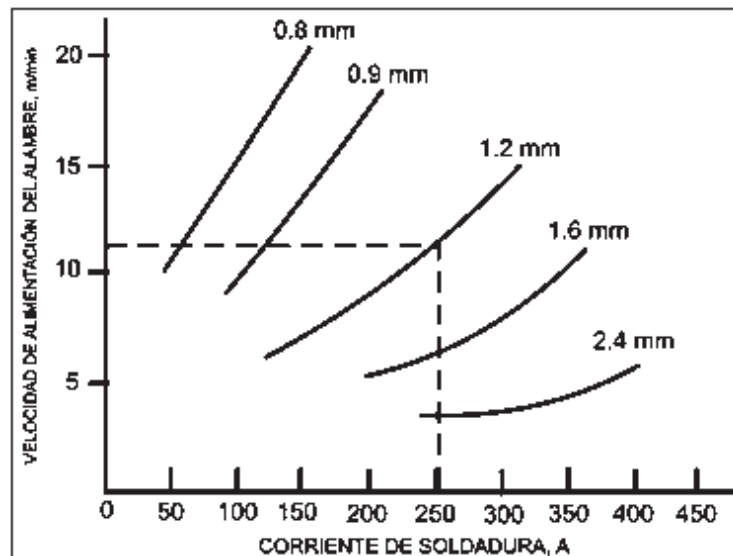


Figura 1.8. Relación entre la corriente de soldadura y la velocidad de alimentación del alambre para electrodos de aluminio (ER 4043).

De acuerdo a la figura 1.8, cuando el diámetro del electrodo aumenta (mientras se mantiene constante la velocidad de alimentación del electrodo), se requiere una corriente de soldadura más alta. Como se puede apreciar, la selección del diámetro del electrodo es muy importante, ya que junto con el tipo de unión, espesor de la misma y posición de soldadura, influyen en la calidad y el costo del material depositado.

Para la soldadura de algunas clases de aluminio y a modo de orientación, se brinda la tabla 1.7 con los rangos de corrientes recomendados en dependencia del tipo de material de aporte y su diámetro. (Ref. 41).

Como puede observarse la intensidad de corriente de soldadura es un parámetro que depende de la velocidad de alimentación del electrodo y en soldaduras de aluminio se debe tomar muy en cuenta este aspecto debido a la ductilidad de los electrodos, ya que si no se selecciona un sistema de alimentación adecuado puede causar deformación del electrodo y por ende interrumpir la alimentación y causar fusión en retroceso. (Ref. 1)

Tabla 1.7 Corrientes de soldadura recomendadas para algunos electrodos de aluminio

Tipo de Aluminio	Electrodo Recomendado	Especificación AWS	Diámetro del Electrodo, mm	Rango de Corriente, A
1100	ER1100 o ER4043	A5.10	08.8	50-175
3003, 3004	ER1100 o ER5356		1.2	90-250
5052, 5454	ER1100, ER5356 o ER5183		1.6	160-350
5083, 5086, 5456	ER5556 o ER5356		2.4	225-400
6061, 6063	ER4043 o ER5356		3.2	350-475

En general, como en todos los procesos de soldadura, la intensidad de corriente se elige con base en:

- Tipo de unión
- Espesor del material base

- Posición de la junta a soldar
- Tipo de material base
- Diámetro del electrodo

En cuanto a su efecto sobre la calidad de la unión soldada, la intensidad de corriente es un factor de primordial importancia en la penetración del cordón, tal como se ilustra en la figura 1.9. Por tal motivo, en la presente investigación, este parámetro de soldadura fue uno de los tres seleccionados para su análisis.

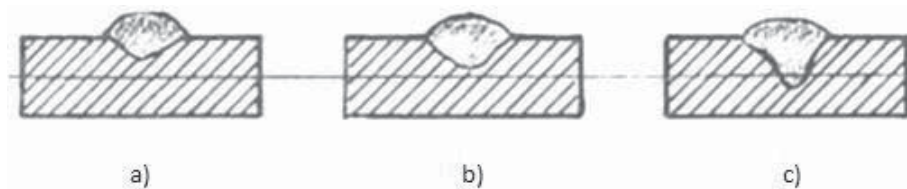


Figura 1.9 Efecto de diferentes amperajes en el cordón de soldadura, a) 100A, b) 150 A y c) 200 A.

1.8.2 Polaridad

El termino *polaridad* se define como la dirección del flujo de corriente. Cuando se trabaja con corriente directa se pueden obtener dos tipos de polaridad: *polaridad inversa* y *polaridad directa*. Como ya se comento anteriormente, la soldabilidad del aluminio y sus aleaciones depende en gran medida de la selección correcta del tipo de polaridad.

1.8.2.1 Polaridad inversa

Cuando el cable de la pistola de soldadura se conecta al terminal positivo de la máquina y la pieza de trabajo al terminal negativo se conoce como *polaridad inversa* o también conocida como corriente directa electrodo positivo (DCEP). En la polaridad invertida los electrones se transportan del material base hacia el electrodo, como se observa en la figura 1.10, donde ceden su energía cinética transformándola en energía térmica. Con esta configuración, aproximadamente el 70% del calor del proceso se concentra en el electrodo, lo cual se refleja en un elevado consumo del material de aporte.

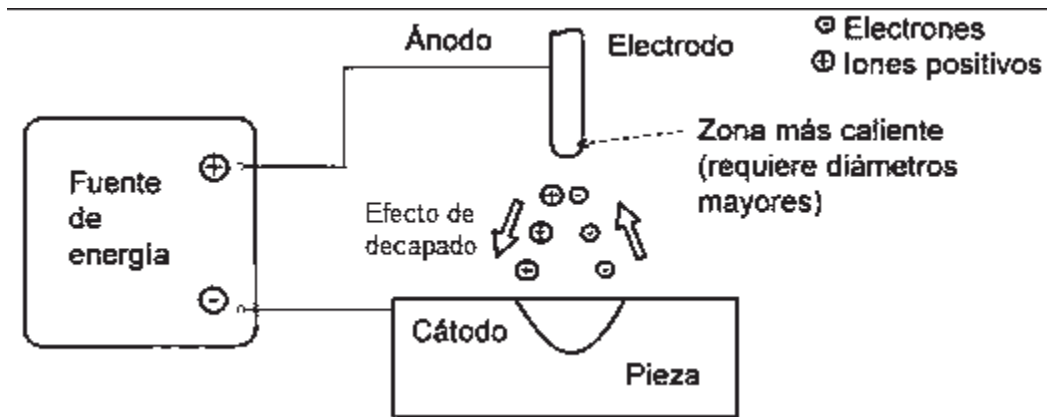


Figura 1.10. Uso de la polaridad inversa en soldadura del aluminio

Como ya se dijo, en la soldadura del aluminio utilizando una polaridad invertida se logra eliminar la capa de óxido (Al_2O_3) formada naturalmente sobre la superficie del metal y permitiendo así la operación de soldadura. La gran mayoría de las aplicaciones en el proceso GMAW utilizan polaridad invertida debido a sus múltiples ventajas tales como: Proporción de un arco estable, transferencia suave del metal de soldadura, salpicaduras relativamente bajas, buenas características del cordón de soldadura y una mayor profundidad de la penetración para un amplio rango de corrientes de soldadura. (Ref. 32)

1.8.2.2 Polaridad directa

La *polaridad directa* consiste en conectar el electrodo al polo negativo y la pieza de trabajo al polo positivo de la máquina, es decir, corriente directa electrodo negativo (DCEN), ver figura 1.11. La polaridad directa es raramente utilizada ya que la transferencia metálica por spray axial no es posible obtenerla, la única transferencia que se logra es la globular. En la polaridad directa los electrones van del electrodo a la pieza de trabajo y, como la capa de óxido de aluminio funde aproximadamente a $2020\text{ }^\circ\text{C}$ y además es refractario, impide una estabilidad del arco eléctrico, al igual que el uso de corriente alterna normal, consiguiendo únicamente incrementar el espesor de dicha capa, sin llegar a romperla y mucho menos a disociarla, por tanto, el uso de corriente continua con polaridad directa no se recomienda bajo ninguna circunstancia para soldar el aluminio y sus aleaciones. (Ref.1, 33).

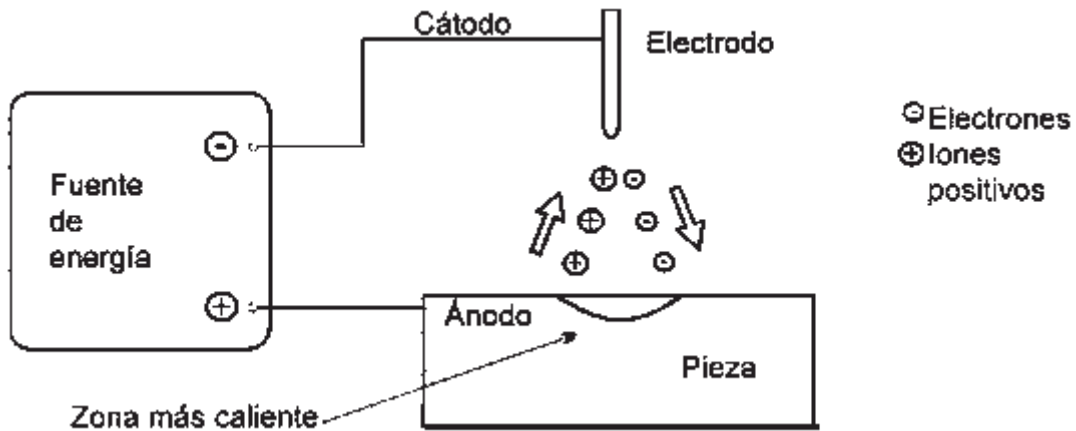


Figura 1.11. Uso de la polaridad directa en soldadura del aluminio

1.8.3 Voltaje de arco (longitud de arco)

Los términos Voltaje de Arco y Longitud de Arco son a menudo utilizados indistintamente. La verdad es que estos términos son diferentes aun cuando efectivamente están relacionados. En el proceso GMAW la longitud del arco es una variable crítica que debe ser cuidadosamente controlada. Por ejemplo, en la transferencia por spray con argón como gas de protección, un arco demasiado corto experimenta momentáneamente cortos circuitos. Estos cortos circuitos pueden causar fluctuaciones de presión que ocasionan la entrada del aire a la columna de arco, produciendo porosidades en la soldadura del aluminio por la disociación de la humedad y la incorporación del hidrogeno al baño metálico, ver figura 1.12. Por otra parte, un arco largo tiende a ser errático, afectando la penetración y el ancho del cordón de soldadura, además de la pérdida de la protección del gas.

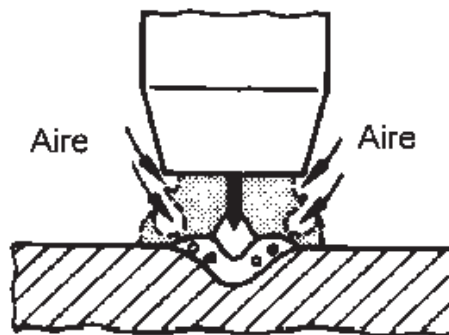


Figura 1.12 Efecto de un arco demasiado corto

La longitud del arco no solo depende del voltaje, sino también de otras variables tales como diámetro y composición del electrodo, gas de protección, técnica de soldadura y la fuente de poder.

El voltaje de arco es una aproximación de la longitud física del arco en términos eléctricos, ver figura 1.13.

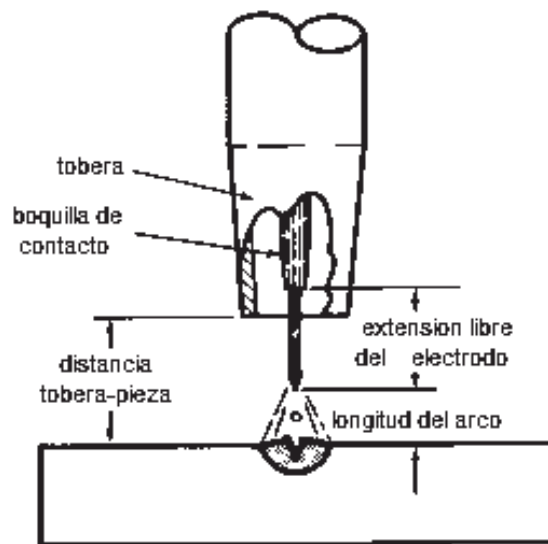


Figura 1.13 Terminología del proceso de soldadura GMAW

Si todas las variables se mantienen constantes, el voltaje del arco está directamente relacionado con la longitud del arco. Aunque la longitud de arco es la variable de interés y la variable que debería ser controlada, el voltaje es más fácil de monitorear. Por esta razón y por el requerimiento normal de que en el procedimiento de soldadura se especifique el voltaje del arco, éste es el término que se utiliza con mayor frecuencia.

Los niveles establecidos de voltaje del arco varían dependiendo del tipo de material base, gas de protección y el tipo de transferencia de metal. En la tabla 1.8 se muestran valores típicos. Se requieren ejercicios de ensayo y error con el objeto de ajustar el voltaje del arco para producir las características de arco más favorables y la apariencia del cordón de soldadura. Estos ensayos son esenciales porque el voltaje de arco óptimo depende de una variedad de factores, incluyendo el espesor del material base, el tipo de junta, la posición de soldadura, el tamaño del electrodo, la composición del gas protector y la categoría de soldadura (soldaduras de ranura o filete, por ejemplo).

Tabla 1.8 Valores de voltajes de arco típicos para el proceso GMAW para diferentes materiales

Metal	Transferencia por spray					Transferencia por corto circuito			
	Ar	He	25 %Ar 75 %He	Ar - 1-5 % O ₂	CO ₂	Ar	Ar + 1-5 % O ₂	75 %Ar- 25 % CO ₂	CO ₂
Aluminio	25	30	29	-	-	19	-	-	-
Magnesio	26	-	28	-	-	19	-	-	-
Acero al carbono	-	-	-	28	30	17	18	19	20
Acero de baja aleación	-	-	-	28	30	17	18	19	20
Aceros inoxidables	24	-	-	26	-	18	19	21	-
Níquel	26	30	28	-	-	22	-	-	-
Aleaciones Níquel-Cromo	26	30	28	-	-	22	-	-	-

A partir de un valor específico del voltaje del arco, un aumento en el voltaje tiende a aplanar el cordón de soldadura e incrementa el ancho de la zona de fusión. Un voltaje excesivamente alto puede causar porosidad, salpicaduras y socavado. La reducción en el voltaje resulta en un cordón de soldadura más angosto con una corona más alta y una penetración más profunda, tal como se muestra en figura 1.14. (Ref. 24, 32)

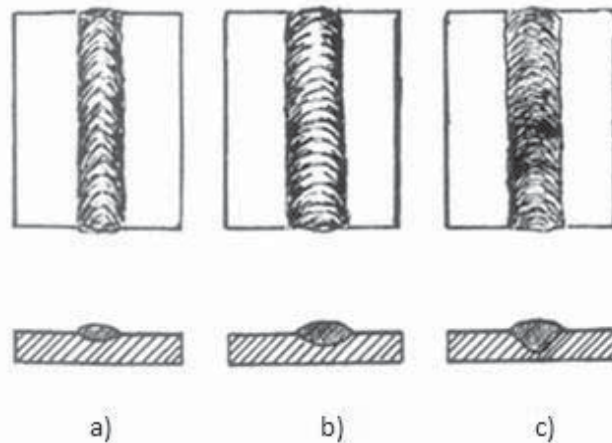


Figura 1.14 Efecto del voltaje en el tamaño y forma del cordón de soldadura: a) 21 volts, b) 24 volts y c) 27 volts

1.8.4 Velocidad de avance

La velocidad de avance de la soldadura es la velocidad lineal del desplazamiento del arco a lo largo de la unión. Un aumento o disminución de la velocidad de avance, modifica el grado de penetración, ancho del cordón y su forma geométrica. En las figuras 1.15a y 1.15b, se muestran los efectos de la velocidad de avance en una unión.

Cuando se reduce la velocidad de avance, se aumenta la deposición del metal de aporte por unidad de longitud. A velocidades muy bajas, el arco de soldadura actúa más en la pileta de metal de soldadura que sobre el metal base, con lo que se reduce la penetración efectiva, esta condición también produce un cordón de soldadura más ancho. En la medida en que se aumenta la velocidad de avance, la cantidad de energía térmica por unidad de longitud de soldadura transferida desde el arco hacia el metal base al principio se aumenta, ya que el arco actúa más directamente sobre el metal base. Con un aumento adicional en la velocidad de avance, se transferirá hacia el metal base menos energía térmica por unidad de longitud de soldadura. Por lo tanto, la fusión del metal base primero se aumenta y luego se disminuye cuando se incrementa la velocidad de avance. Si se aumenta todavía más la velocidad de avance, habrá una tendencia a producir socavado a lo largo de los bordes del cordón de soldadura debido a que hay insuficiente deposición de metal de aporte para llenar el trayecto fundido por el arco.

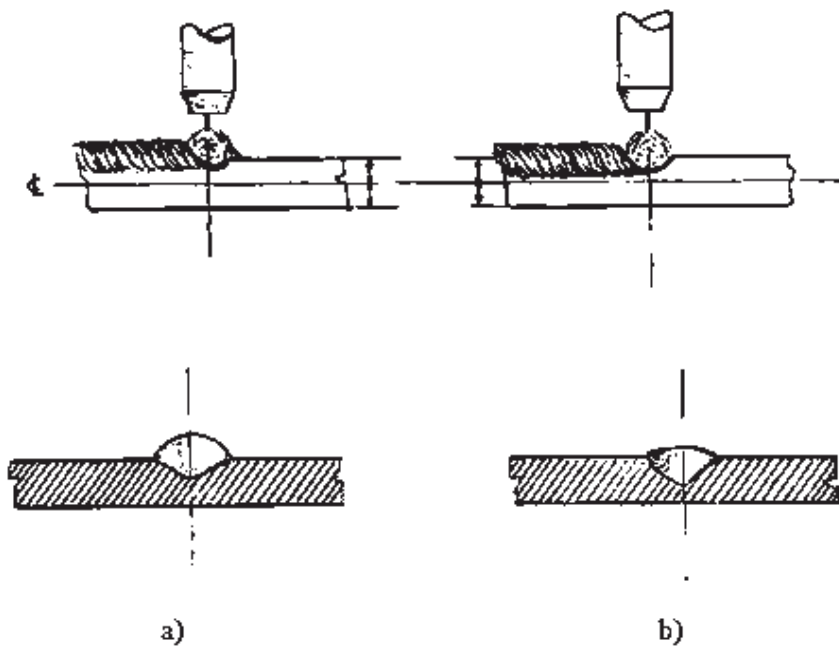


Figura 1.15 Efecto de la velocidad de avance en el cordón de soldadura, a) velocidad de avance demasiado baja, b) velocidad de avance correcta.

Como se puede observar, la velocidad de avance de la soldadura es un parámetro muy importante en el tamaño y forma del cordón de soldadura, y en la cantidad de calor aportado al material base, y por consiguiente, en las propiedades mecánicas finales de la unión. Por tal motivo, en el desarrollo del presente trabajo la velocidad de avance fue otro de los parámetros de soldadura seleccionados para su estudio.

1.8.5 Extensión libre del electrodo

La extensión libre del electrodo es la distancia entre el extremo del tubo de contacto o tobera y la punta del electrodo, tal como se muestra en la figura 1.16. Cuando se aumenta la extensión libre del electrodo se produce un aumento en su resistencia eléctrica. El calentamiento por resistencia, a su vez, hace que la temperatura del electrodo se eleve, lo que resulta en un pequeño incremento de la velocidad de fusión del electrodo. En general, la mayor resistencia eléctrica produce una caída de voltaje mayor entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo. Esta situación es detectada inmediatamente por la fuente de potencia, la cual compensa este aumento con una reducción en la corriente. Esto de inmediato reduce la velocidad de fusión del electrodo y permite que se acorte la longitud física del arco. En consecuencia, a menos que haya un incremento de voltaje en la máquina de soldar, el metal de aporte depositará un cordón angosto y de corona alta.

La extensión libre del electrodo deseable está generalmente entre 6 a 13 mm para la transferencia por corto circuito y de 13 a 15 mm para los otros tipos de transferencias en la soldadura del aluminio y sus aleaciones. (Ref. 1). Como se puede observar en la figura 1.16, el tamaño de la extensión libre del electrodo tiene una influencia importante en la geometría y penetración del cordón de soldadura, a menor extensión libre del electrodo mayor es la penetración y viceversa.

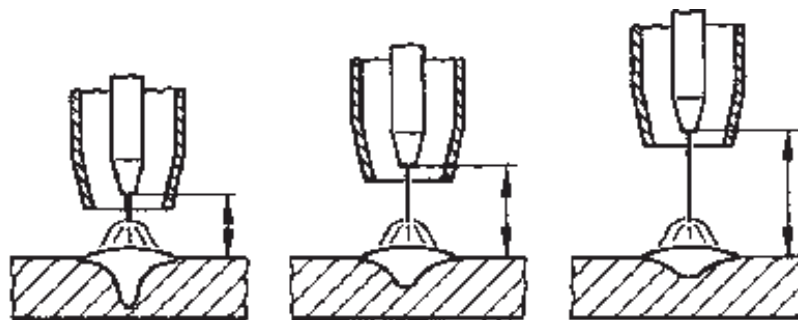


Figura 1.16. Efecto de diferentes longitudes libres del electrodo sobre el cordón de soldadura

1.8.6 Orientación del electrodo

Como en todos los procesos de soldadura por arco, la orientación del electrodo con respecto a la junta a soldar también afecta la forma del cordón de soldadura y la penetración. Este efecto sobre la calidad del cordón de soldadura se considera mayor que el del voltaje de arco o el de la velocidad de avance. La orientación del electrodo se describe en dos sentidos: ángulo de trabajo y ángulo de desplazamiento.

- **Ángulo de trabajo**

También llamado ángulo transversal, es el ángulo que forman el eje del electrodo y la superficie de la pieza de trabajo. En uniones a tope en posición plana, generalmente el ángulo de trabajo es de 90° , tal como se puede observar en figura 1.17a, mientras que en uniones de ángulo o filete el ángulo de trabajo debe ser de 45° (figura 1.17 b).

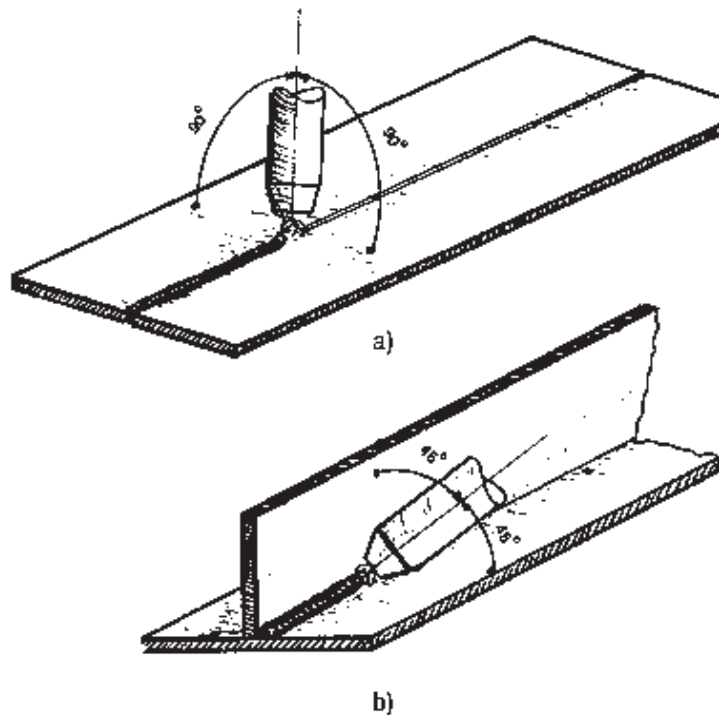


Figura 1.17 Muestra los ángulos de trabajo para dos tipos de soldaduras, a) Soldadura a tope, b) Soldadura de filete.

- **Ángulo de desplazamiento**

Es el ángulo que se forma entre el eje del electrodo con respecto a la dirección de desplazamiento de la soldadura. Cuando el electrodo apunta en la dirección opuesta a la dirección del desplazamiento, la técnica se denomina *soldadura de revés con ángulo de arrastre*. Cuando el electrodo apunta en la dirección del desplazamiento, la técnica se conoce como *soldadura de derecha o avance con ángulo de empuje*.

Estos ángulos y técnicas pueden proporcionar en soldadura diferentes resultados que son determinantes en las características finales de la unión. Su uso está relacionado con los resultados que se quieran alcanzar. La orientación del electrodo y su efecto sobre el ancho y la penetración de la soldadura se ilustran en las figuras 1. 18 A, B y C.

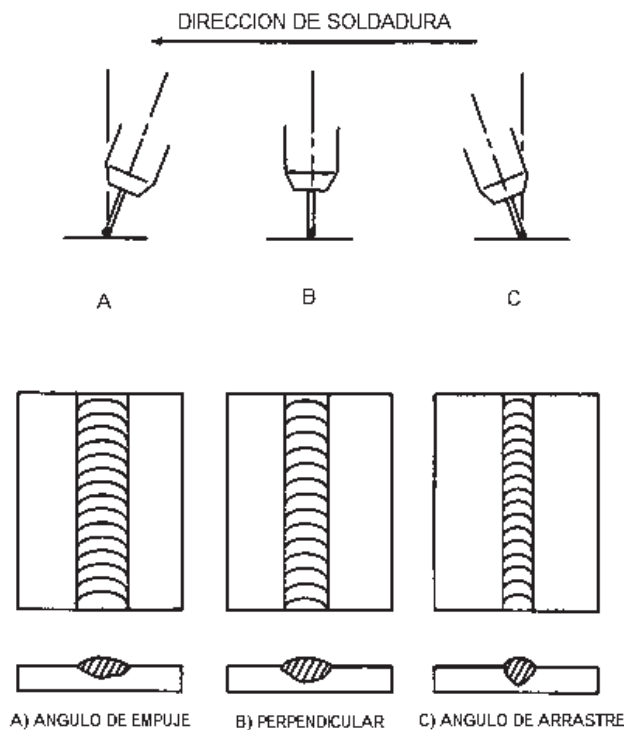


Figura 1.18 Efecto de la posición del electrodo y la técnica de soldadura sobre el cordón.

Cuando el electrodo se saca de la perpendicular dándole un ángulo de ataque y con todas las demás condiciones sin alteración, la penetración disminuye y el cordón de soldadura se hace más ancho y plano.

La máxima penetración en la posición plana se obtiene con la técnica de arrastre, empleando un ángulo de arrastre de unos 25° con respecto a la perpendicular. Esta técnica también produce un cordón de soldadura más convexo y angosto, un arco más estable y menos salpicaduras sobre la pieza de trabajo. Para todas las posiciones, el ángulo de desplazamiento que generalmente se utiliza es un ángulo de arrastre que esté entre 5° y 15° con el fin de tener un buen control y protección de la piqueta de soldadura. Para algunos materiales, tales como el aluminio, se prefiere una técnica de avance o empuje. Esta técnica produce una “acción limpiadora” adelante del metal de soldadura fundido que reduce su tensión superficial y la oxidación del metal base.

Como se puede ver, la orientación del electrodo es un parámetro de soldadura muy importante, el uso de ángulos incorrectos sea de trabajo o de desplazamiento produce desperfectos en el cordón de soldadura, tales como acumulación lateral del material aportado, falta de penetración, exceso de salpicaduras, solapas frías, entre otros. (Ref. 1, 24, 32). Por todo esto, en el presente trabajo de investigación, el ángulo de trabajo fue uno de los parámetros de soldadura que se estuvo variando, con la finalidad de evaluar su efecto en la calidad del cordón de soldadura

1.8.7. Tamaño del electrodo

El diámetro del electrodo influye en la configuración de la soldadura. En la soldadura del aluminio, al igual que en otros materiales se inicia con la selección del material de aporte. La primera consideración es el diámetro, que puede variar de 0.635 mm a 6.35 mm. Los diámetros mayores son más fáciles de alimentar, por lo que se recomienda el uso de mayores diámetros.

El segundo factor en la selección del material de aporte es el tipo de aleación. Dos tipos básicos de electrodos son usados en la soldadura de aluminio, los cuales son: el ER4043 y el ER5356. El ER4043 es más dúctil y, por consiguiente, más difícil para alimentarse. El ER5356 es recomendable si la aplicación es apta, desde luego este electrodo es más rígido y puede alimentarse más fácilmente. El tipo de electrodo debe ser compatible con la aleación a soldar y proveer la tensión y ductilidad requeridas, en la tabla 1.9 se muestran los electrodos más utilizados para la soldadura de aluminio y sus aleaciones con sus respectivas composiciones químicas. (Ref. 12).

Tabla 1.9 Composición química de electrodos de aluminio más utilizados

AWS	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Cr	%Zn	% Ti	% Al
ER1100	<0,95	<0,95	0,05 -0,20	0,05	-	-	0,10	-	99,0
ER1188	0,06	0,06	0,005	0,01	0,01	-	0,03	0,01	99,88
ER2319	0,20	0,03	5,8-6,8	0,20-0,40	0,02	-	0,10	0,10-0,20	RESTO
ER4009	4,5-5,5	0,20	1,0-1,5	0,10	0,45-0,6	-	0,10	0,10-0,20	RESTO
ER4010	6,5-7,5	0,20	0,20	0,10	0,30-0,45	-	0,10	0,20	RESTO
ER4011	6,5-7,5	0,20	0,20	0,10	0,45-0,7	-	0,10	0,04-0,20	RESTO
ER4043	4,5-6,0	0,8	0,30	0,05	0,05	-	0,10	0,20	RESTO
ER4047	11,0-13,0	0,8	0,30	0,15	0,10	-	0,20	-	RESTO
ER4145	9,3-10,7	0,8	3,3-4,7	0,15	0,15	-	0,20	-	RESTO
ER4643	3,6-4,6	0,8	0,10	0,05	0,10-0,30	-	0,10	0,15	RESTO
ER5183	0,40	0,40	0,10	0,50-1,0	4,3-5,2	0,05-0,25	0,25	0,15	RESTO
ER5356	0,25	0,40	0,10	0,05-0,20	4,5-5,5	0,05-0,20	0,10	0,06-0,20	RESTO
ER5554	0,25	0,40	0,10	0,50-1,0	2,4-3,0	0,05-0,20	0,25	0,05-0,20	RESTO
ER5556	0,25	0,40	0,10	0,50-1,0	4,7-5,5	0,05-0,20	0,25	0,05-0,20	RESTO
ER5654	<0,45	<0,45	0,05	0,01	3,1-3,9	0,15-0,35	0,20	0,05-0,15	RESTO

Como se puede observar, existen varios tipos de electrodos para la soldadura del aluminio y sus aleaciones, pero solo uno será el óptimo para una aplicación específica. Para la selección correcta de los mismos, a manera de orientación se puede utilizar la tabla 1.10. (Ref. 41).

Tabla 1.10. Selección de los metales de aporte para la soldadura del aluminio y sus aleaciones

<i>Metal base</i>	7005 7039 7004	6061 6063 6101 6151	5456	5454	5154 5254	5086	5083	5052 5652 a	5005 5050	3004	2219	2014 2039	1100 3003	1160 1070 1080 1350
1060, 1070 1080, 1350	4043 d,e	4043 e	5356 g	4043 e,g	5356 e,f,g	5356 g	5356 g	4043 e,g	1100 e,f	4043 e,g	4145 e,f	4145	1100 e,f	1188 e,f,l
1100 3003	4043 d,e	4043 e	5356 g	4043 e,g	5356 e,f,g	5356 g	5356 g	4043 e,g	1100 e,f	4043 e,g	4145 e,f	4145	1100 e,f	-
2014 2036	-	4145	-	-	-	-	-	-	4145	4145	4145 h	4145 h	-	-
2219	4043 e	4043 d,e	-	4043 e	4043 e	-	-	4043 e,g	4043 d,e	4043 d,e	2219 d	-	-	-
3004	5356 i	4043 e,i	5356 e,i	5356 i	5356 i	5356 g	5356 g	5356 e,f,k	5356 f,k	5356 f,k	-	-	-	-
5005 5050	5356 i	4043 e,i	5356 g	5356 i	5356 i	5356 g	5356 g	5356 e,f,g	5356 f,k	-	-	-	-	-
5052 5652	5356 i	5356 f,i	5356 i	5356 i	5356 i	5356 g	5356 g	5654 f,i,k	-	-	-	-	-	-
5083	5183 g	5356 g	5183 g	5356 g	5356 g	5356 g	5183 g	-	-	-	-	-	-	-
5086	5356 g	5356 g	5356 g	5356 g	5356 g	5356 g	-	-	-	-	-	-	-	-
5154 5254	5356 i	5356 i	5356 i	5356 i	5654 i,k	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5454	5356 i	5356 f,i	5356 i	5554 h,i	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5456	5556 g	5356 g	5556 g	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6061, 6101 6063, 6151 6201, 6351 6951	5356 e,f,i	4043 d,e,j	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7005, 7039 7004	5356 g	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- a) En condiciones de servicio que pueden ser: inmersión en agua dulce o salada, expuesto a sustancias químicas específicas o sometidos a altas temperaturas (mayores de 66 ° C), puede limitar la selección de los metales de aportes. Los metales de aporte ER5183, ER5356 y ER5654 no son recomendados para el servicio a elevadas temperaturas.
- b) Las recomendaciones de esta tabla son aplicadas a procesos con protección gaseosa.
- c) Cuando el metal de aporte no se da en la tabla, es que la combinación de metales, no es soldable.
- d) El metal de aporte ER4145 se puede utilizar para diferentes trabajos.
- e) El metal de aporte ER4047 se puede utilizar para diferentes trabajos.
- f) El metal de aporte ER4043 se puede utilizar para diferentes trabajos.
- g) Pueden ser utilizados metales de aporte ER5183, ER5356 y ER5556.
- h) El metal de aporte 2319 se puede utilizar para diferentes trabajos.
- i) Pueden ser utilizados metales de aporte ER5183, ER5356, ER5556, ER5556 y ER 5654. En algunas ocasiones estos metales de aporte provocan alta ductilidad y resistencia a las uniones así como homogeneidad de color durante el anodizado. El metal de aporte ER5554 es desarrollado para el servicio a altas temperaturas.
- j) El metal de aporte ER4643 puede brindar alta resistencia en uniones de ranura en 12.5 mm con metales base del tipo 6XXX cuando son tratados térmicamente posterior a la soldadura. Las piezas de 5254 y 5356 se utilizan para medios en contacto con peróxido de hidrógeno.
- k) El metal de aporte recomendado para temperaturas menores o iguales a 66 °C es el ER5654.
- l) El metal de aporte 1100 se puede utilizar para diferentes trabajos.

1.8.8 Gas de protección

El uso correcto del gas de protección (adecuado al tipo de aplicación), o de una mezcla, es otro factor determinante en soldadura, siendo que el uso de determinado gas o de una combinación de gases, influyen en la penetración y geometría de un cordón de soldadura, cuando las demás condiciones se mantienen con un ajuste correcto. En soldadura de arco metálico con protección de gas de materiales no ferrosos se emplean gases inertes como protección. En la naturaleza existen solo seis gases inertes: helio, argón, neón, criptón, radón y xenón. De ellos, solo el helio y el argón son importantes en soldadura, y esto se debe a que son los únicos gases nobles que se pueden obtener por licuefacción y destilación del aire en cantidades considerables y son completamente inertes. Las principales diferencias físicas entre el argón y el helio son la densidad, conductividad térmica y potencial de ionización.

El argón es aproximadamente 1.4 veces más denso que el aire, mientras que la densidad del helio es aproximadamente 0.14 veces la densidad del aire. El peso del argón lo hace más efectivo como gas de protección en soldaduras de posición plana y horizontal de filete, ya que desplaza fácilmente al aire circundante. Debido a la baja conductividad térmica del argón, el plasma del arco que arde en este gas se caracteriza por poseer un núcleo central con alta energía y una zona

exterior de menor energía, lo que se refleja fuertemente en la morfología del cordón de soldadura con una penetración irregular, siendo mucho mayor en la parte central del cordón, ver figura 1.19.

Por otro lado, La energía de ionización del argón es de 15.7 eV, relativamente inferior a la del helio (24,5 eV), lo que provoca que para una misma longitud de arco el voltaje sea menor, y que para un mismo amperaje se produzca menor cantidad de calor. Por consiguiente, con helio como gas protector, el cordón de soldadura será más ancho y con menor penetración como resultado de un voltaje del arco mucho más elevado que si se usa argón, tal como se observa en la figura 1.19.

Por lo tanto, el perfil de soldadura obtenido con helio provoca la necesidad del empleo de mezclas de argón - helio. El resultado se muestra en la figura 8.1, en el que se obtiene un perfil adecuado, más la transferencia por arco spray axial característica del argón. Además, como ya se mencionó el uso de argón puro como gas de protección produce mayor número de porosidades que el usar una mezcla de 25% argón más 75% helio. (Ref. 5).

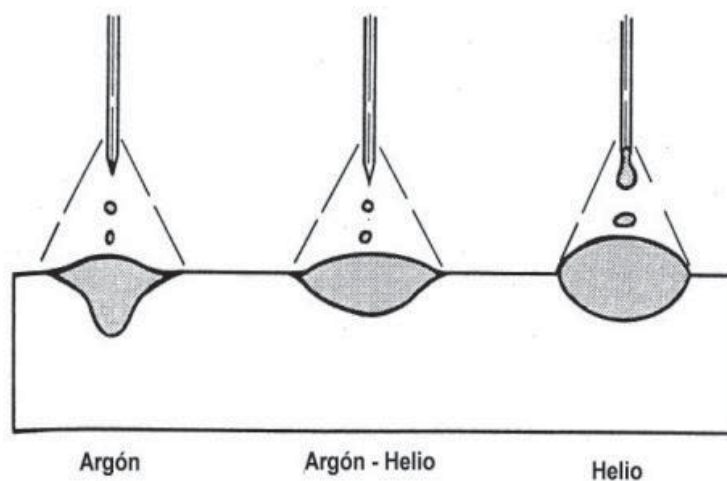


Figura 1.19 Contorno y penetración del cordón de soldadura con diferentes gases protectores.

Ahora bien, el helio presenta problemas en la ionización durante el inicio del arco, produciendo mayor número de salpicaduras y una rugosidad superficial más apreciable, que la que se presenta cuando se usa argón. En general, se requiere aproximadamente de dos a tres veces más flujo de helio para proveer la misma protección que el argón. (1, 24, 32).

En la tabla 1.11 se muestran algunos rangos de flujo de gas de protección recomendados para la soldadura del aluminio y sus aleaciones en varias posiciones. Con transferencias por cortocircuito, las mezclas de argón-helio con un porcentaje de helio que puede estar entre 60-90% son usadas para obtener los mayores niveles de calor aportado en el metal base, con las mejores características de fusión. Las mezclas de argón con 50-75 % de helio incrementan el voltaje de arco por encima del argón puro, por lo que son usados para la soldadura del aluminio, magnesio y cobre, para de esa forma contrarrestar un poco la característica de la alta conductividad térmica de estos materiales, aumentando el calor aportado. (Ref. 32)

Tabla 1.11 Flujos de gas recomendados para la soldadura del aluminio y sus aleaciones.

Posición	Flujo de gas de protección (l/min)		
	Argón	Helio	75%He + 25%Ar
Plana	22-31	31-40	27-36
Horizontal	22-31	31-40	27-36
Vertical	22-31	31-40	27-36
Sobrecabeza	31-40	36-45	31-40

Estos valores de flujo de gas se aplican a electrodos de diámetros de 0.8 – 1.5 mm y toberas de 15 – 19 mm. Con electrodos de diámetros de 0.8 y 1.2 mm el flujo se puede disminuir un 20% por debajo del rango normal. Los mayores valores de flujos se aplican a los mayores espesores y a las aleaciones que posee mayor cantidad de magnesio.

En general, la selección del gas de protección para el proceso GMAW depende de los siguientes factores:

- Tipo de material a soldar
- Espesor de la junta
- Requerimientos de calidad
- Factores metalúrgicos.

1.8.9 Mecanismos de transferencia de metal

El proceso GMAW se caracteriza por utilizar diversas formas de transporte de metal desde la punta del electrodo hasta el baño metálico, estos tipos son:

1. Transferencia por corto circuito.
2. Transferencia globular.
3. Transferencia por spray o rocío.
4. Transferencia por corriente pulsada.

El tipo de transferencia, está determinado por los siguientes factores fundamentalmente: Intensidad de la corriente de soldadura, Diámetro del electrodo, Composición del electrodo, Longitud del arco, Fuente de poder y Gas de protección. En la figura 1.20 se muestran en conjunto los cuatro tipos de mecanismos de transferencia de metal de aporte.

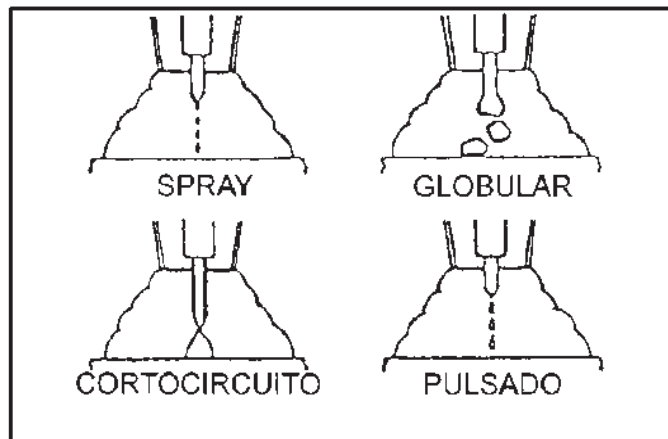


Figura 1.20 Mecanismos de transferencia del metal

1.8.9.1 Transferencia por corto circuito

Este tipo de transferencia se presenta con intensidades de corriente y voltajes bajos de soldadura, tal como se muestra en la figura 1.21, y con diámetros de electrodo pequeños. La transferencia por corto circuito produce una pileta de soldadura pequeña, de rápida solidificación, apropiado para unir secciones delgadas, soldar fuera de posición y pasadas de raíz anchas.

El metal no es transferido libremente a través del arco, sino que se deposita, cuando la punta del electrodo toca el metal base. En este tipo de transferencia del metal de aporte, cuando la punta del electrodo toca la pileta de soldadura, se crea momentáneamente un corto circuito que hace que se incremente la corriente lo suficiente para desprender el metal fundido y restablecer el arco eléctrico entre el electrodo y la pieza de trabajo. El ciclo se repite alrededor 20 hasta más de 200 veces por segundo. Esta transferencia es típica de los procesos con gas de protección CO₂, y puede producir fusión incompleta en espesores de 3.2 mm en adelante. (1).

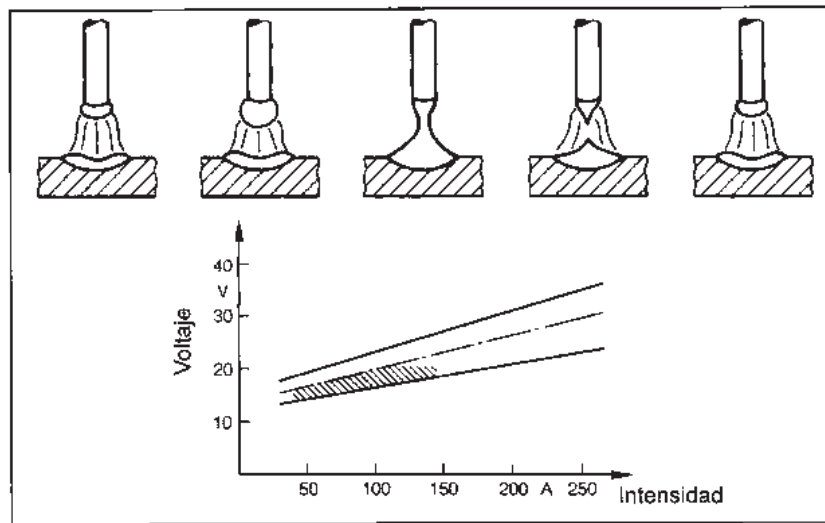


Figura 1.21 Transferencia por corto circuito con sus rangos promedios de voltajes y amperajes

1.8.9.2 Transferencia globular

Este tipo de transferencia de metal se obtiene cuando la corriente es relativamente baja sin importar el tipo de gas de protección. Sin embargo, utilizando bióxido de carbono y helio con corrientes de soldadura y voltajes superiores a la de corto circuito e inferiores a la transferencia por spray, se obtiene una transferencia globular, ver figura 1.22. Se caracteriza porque al fundirse la punta del electrodo producto del calor del arco se forma una gota de metal fundido que llega a alcanzar relativamente grandes dimensiones, mayores que el diámetro de dicho electrodo, la facilidad de la transferencia de la gota al baño por efecto de la fuerza de gravedad limita el empleo de esta transferencia a la soldadura en posición plana.

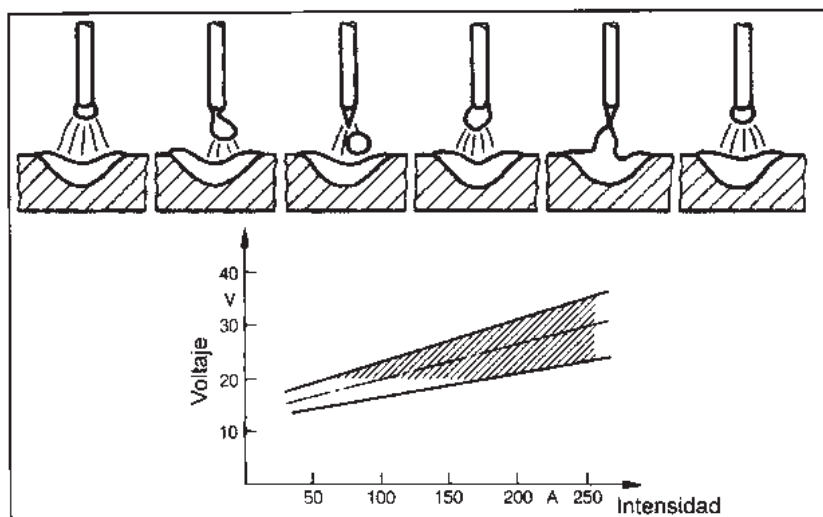


Figura 1.22 Transferencia globular con sus voltajes e intensidades promedios

1.8.9.3 Transferencia por spray

La transferencia por spray o corto circuito ocurre a elevadas intensidades de corriente y voltajes de soldadura, ver figura 1.23, con argón puro o con una mezcla rica en argón, Las gotas de metal fundido son menores o iguales al diámetro del alambre y forman una corriente axial de gotas finas. Este modo de transferencia es el resultado de un flujo discontinuo de gotas que son aceleradas mediante las fuerzas del arco a velocidades que superan el efecto de la gravedad; debido a esto, bajo ciertas condiciones, el proceso puede usarse en cualquier posición. Por otra parte, debido a que las gotas son más pequeñas que la longitud del arco, los cortocircuitos no ocurren y las salpicaduras son insignificantes o totalmente eliminadas.

El modo de transferencia por spray puede usarse para soldar la mayoría de los metales o aleaciones debido a las características inertes de la protección del argón. No obstante, la aplicación del proceso a chapas delgadas puede ser difícil debido a la alta corriente necesaria para producirla. Las fuerzas de arco resultante pueden cortar las chapas relativamente delgadas en lugar de soldarlas.

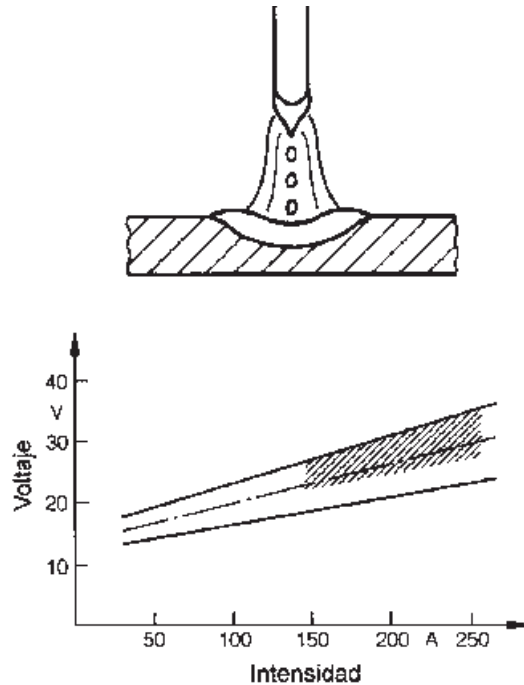


Figura 1.23 Transferencia por spray con sus voltajes e intensidades promedios para su obtención

Los espesores de trabajo y las limitaciones de la posición de soldadura en la transferencia por spray han sido superados con fuentes de energía especialmente diseñadas, que brindan a la salida una corriente pulsada, la que junto a este tipo de transferencia garantizan muy buenos resultados.

1.8.9.4 Transferencia por corriente pulsada

Una de las más novedosas fuentes de energía para el proceso GMAW lo constituyen las fuentes que poseen *arco pulsado*, las que pueden ser del tipo rectificador o inversor. Estas máquinas producen una forma de onda cuidadosamente controlada que pulsa el arco de soldadura. Dichas fuentes proporcionan dos nivel de corriente: uno constante inferior, con un nivel de corriente bajo (corriente de fondo), que mantiene el arco sin proporcionar suficiente energía para formar la gota desde la punta del alambre, y el otro que se produce mediante pulsaciones de una corriente superior (corriente de pico), superior a la corriente de transición y que da el requisito para que ocurra la transferencia por spray, ver figura 1.24. En general la corriente de pico se ajusta hasta dos veces o por lo menos 1.25 veces la corriente normal de estado uniforme que se usaría para el mismo trabajo, siendo la corriente de base un 25 % de la de pico, con vistas a mantener un arco estable. Durante cada pulso se forman y se transfieren una o más gotas. La frecuencia y amplitud

del pulso controla el nivel de energía del arco, y por consiguiente la razón de fusión del mismo. Con frecuencia este tipo de transferencia de metal se denomina “spray pulsado”, ya que constituye una variación de la transferencia por spray. De esta forma se reduce la corriente de soldadura promedio y la consiguiente razón de depósito comparado con el empleo del proceso GMAW con transferencia spray ordinario.

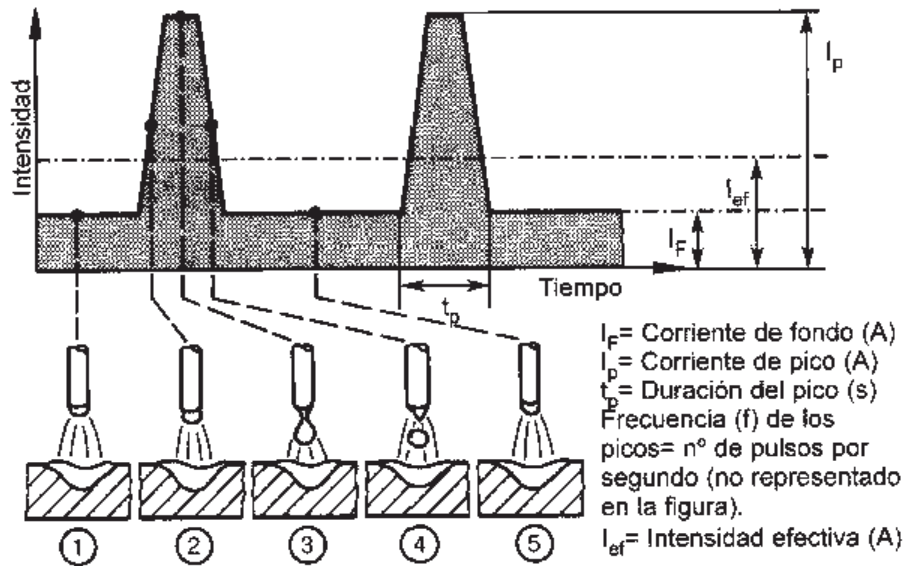


Figura 1.24. Características de la transferencia por corriente pulsada de soldadura

La ventaja fundamental del empleo de proceso GMAW con arco pulsado es la reducción de la energía promedio del arco y la tasa de fusión del alambre, disminuyendo el calor introducido en la pieza con respecto al proceso ordinario por arco spray, lo que se traduce en la posibilidad de soldar con transferencia spray pequeños espesores, que provoca menores deformaciones, que facilita la soldadura en posición no plana y el control del baño por parte del soldador, que permite el empleo de diámetros de electrodo mayores y finalmente que reduce las salpicaduras. Debido a las ventajas ya señaladas, la transferencia por arco pulsado es de excelente aplicación para la soldadura del aluminio y sus aplicaciones en todas las posiciones. (Ref. 32)

Como se puede observar, el conocimiento y el control óptimo de las variables o parámetros de soldadura es esencial para producir uniones libres de defectos. En la figura 1.25 se muestra un esquema representativo que resume el efecto que dichos parámetros tienen sobre la calidad final de la unión.

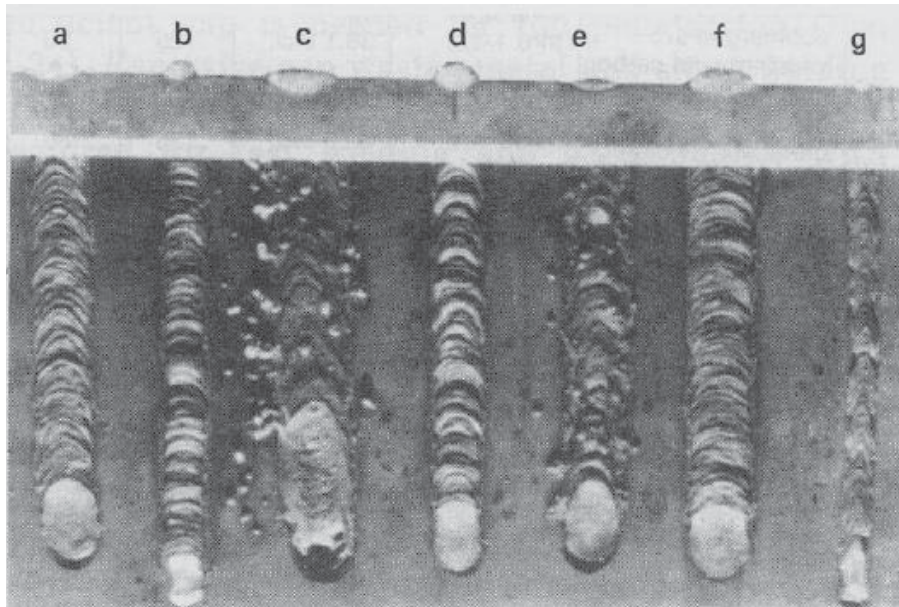


Figura 1.25 Efecto de los parámetros operacionales del proceso en el cordón soldadura, a) amperaje, longitud de arco y velocidad de avance apropiados, b) amperaje demasiado bajo, c) amperaje demasiado alto, d) longitud de arco demasiado corta, e) longitud de arco demasiado grande, f) velocidad de desplazamiento demasiado lenta y g) velocidad de desplazamiento demasiado rápida.

1.9 Tipos de juntas

El tipo de unión o junta es la configuración o arreglo físico de los elementos a soldar. Existen 5 tipos básicos de juntas empleadas en soldadura: *a tope*, *en esquina*, *a traslape*, *de borde* y *en T*, los cuales se ilustran en la figura 1.26.

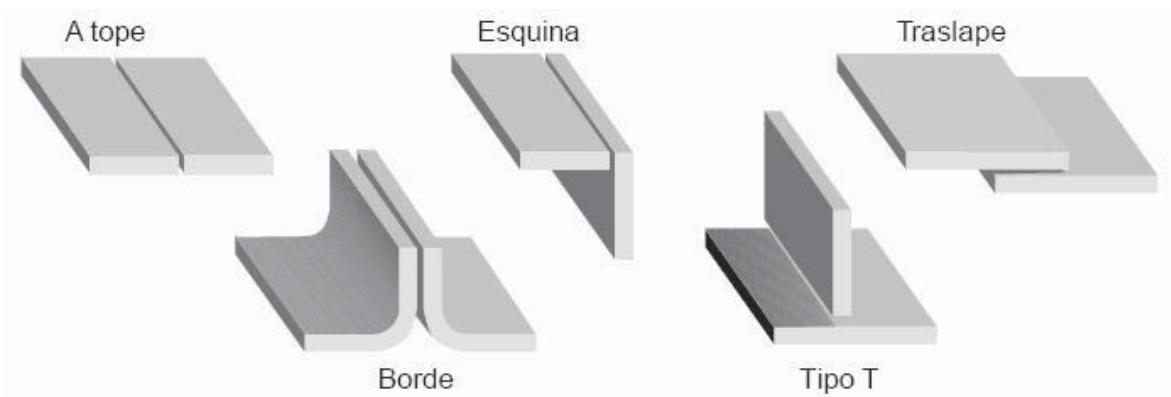


Figura 1.26 Tipos de juntas

1.10 TIPOS DE SOLDADURA

El tipo de soldadura es la forma que toma la sección transversal del metal de aporte y/o más el metal base después de realizada la operación de soldadura. Los tipos de soldadura dependen del tipo y preparación de la junta, y se clasifican de la siguiente manera: *soldadura a tope*, *soldadura de filete*, *soldadura de tapón y en ojal*, *soldadura por puntos*, *soldadura de costura*, *soldadura por el reverso*, *soldadura de respaldo* y *soldadura de recargue*.

En la presente investigación se trabajó con una soldadura de filete, por tal motivo, se explicará un poco más a detalle este tipo de soldadura.

1.10.1 Soldadura de filete

La soldadura de filete es aquella que une dos superficies que forman entre sí un ángulo recto. Se aplica en juntas *a traslape*, *en "T"* y *en esquina*, ver figura 1.27. Generalmente los bordes de las piezas son planos. Es el tipo de soldadura que más se utiliza debido a que no requiere de una preparación especial, es más resistente que la soldadura a tope y puede requerir o no de metal de aporte. Sus principales usos son en estructuras de soporte, en reparación y para extender un elemento a la especificación requerida, en tanques y recipientes a presión, entre otros. En la figura 1.28 se ilustran las partes más importantes que conforman una soldadura de filete.

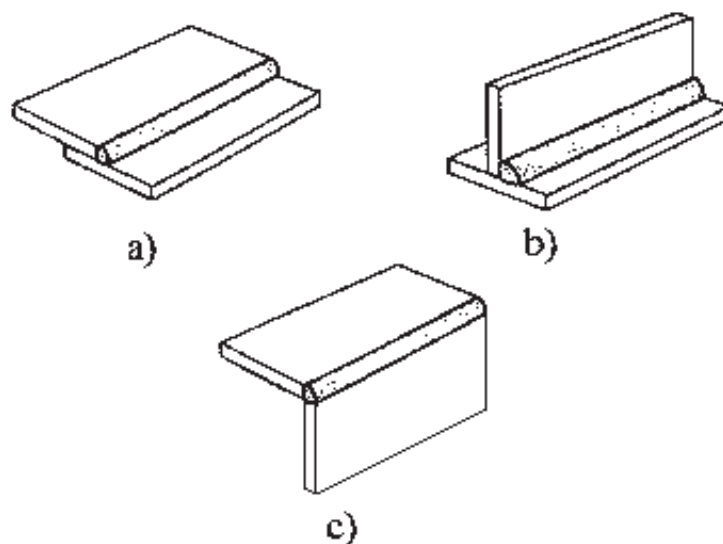


Figura 1.27 Soldaduras de filete: a) Traslape, b) En "T" y c) En esquina.

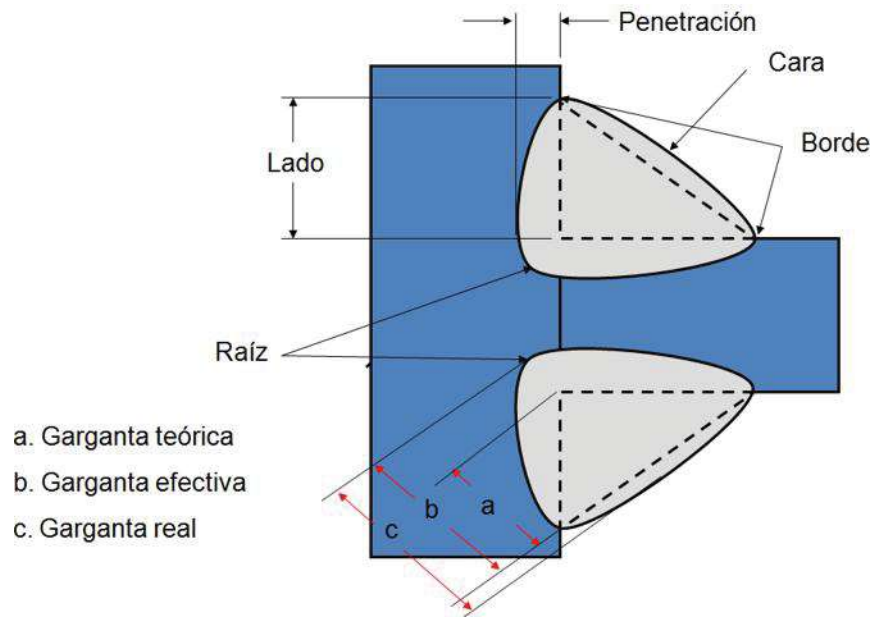


Figura 1.28 Terminología de una soldadura de filete

En las soldaduras de filete el tamaño del filete debe ser en relación al espesor del material base. Por otro lado, La convexidad, C , de una soldadura o la superficie nominal de un cordón con dimensión, W , ver figura 1.29, no debe exceder los valores mostrados en la tabla 1.12. (Ref. 41).

En la figura 1.30 se muestran los defectos típicos encontrados en soldaduras de filete, los cuales reducen de una u otra manera el comportamiento mecánico de la unión soldada, por tanto, son considerados como perfiles de soldadura inaceptables. (Ref. 41).

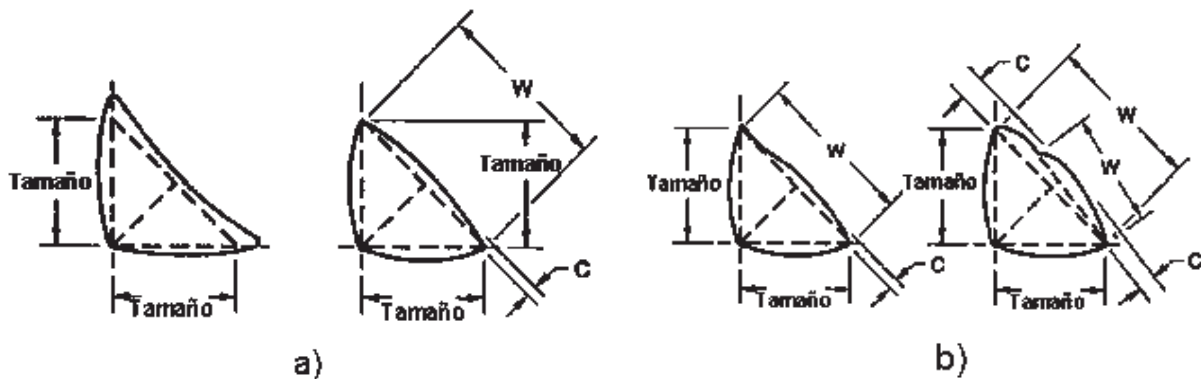


Figura 1.29 Perfiles de soldaduras de filete, a) Perfiles deseables y b) Perfiles aceptables.

Tabla 1.12 Especificaciones para la convexidad del cordón en soldaduras de filete

Ancho de la cara o superficie nominal del cordón, W.	Convexidad máxima.
$W < 8 \text{ mm}$	2 mm
$W > 8 \text{ mm}$	3 mm
$W > 25 \text{ mm}$	5 mm

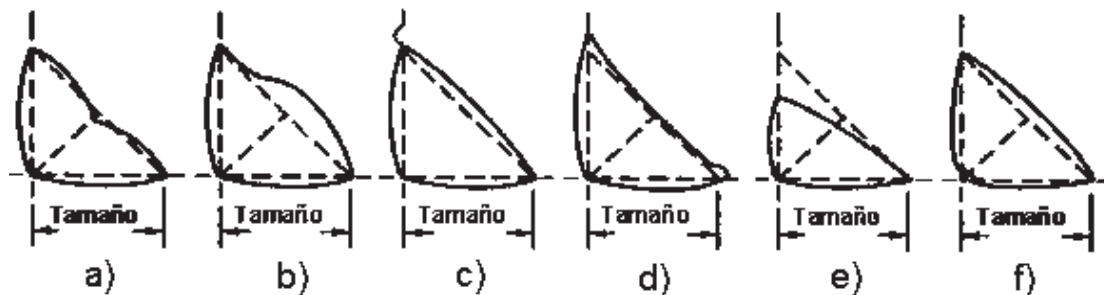


Figura 1.30 Defectos típicos en soldaduras de filete, a) Garganta insuficiente, b) Convexidad excesiva, c) Socavado excesivo, d) Solapes, e) Lado insuficiente y f) Fusión incompleta.

1.11 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

La experimentación forma parte natural de la mayoría de las investigaciones científicas e industriales, en muchas de las cuales, los resultados del proceso de interés se ven afectados por la presencia de distintos factores, cuya influencia puede estar oculta por la variabilidad de los resultados muestrales. Es fundamental conocer los factores que influyen realmente y estimar esta influencia. Para conseguir esto, es necesario experimentar variando las condiciones que afectan a las unidades experimentales y observar la variable de respuesta. Del análisis y estudio de la información recogida se obtienen las respectivas conclusiones. (Ref. 28). La forma tradicional que se utilizaba en la experimentación, para el estudio de estos problemas, se basaba en estudiar los factores uno a uno, esto es, variar los niveles de un factor permaneciendo fijos los demás. Esta metodología presenta grandes inconvenientes tales como:

- Es necesario una gran cantidad de pruebas.
- Las conclusiones obtenidas en el estudio de cada factor tiene un campo de validez muy restringido.
- No es posible estudiar la existencia de interacción entre los factores.
- Es inviable, en muchos casos, por problemas de tiempo o costo.

Como ya se ha comentado, el tamaño y forma del cordón de soldadura juega un importante rol en las propiedades mecánicas finales de la unión soldada. Variables de la geometría del cordón, tales como ancho del cordón, altura y profundidad de penetración, están fuertemente correlacionadas a los parámetros operacionales del proceso incluyendo corriente de soldadura, velocidad de avance y ángulo de trabajo, entre otros. Por tal motivo, es muy importante la selección correcta de estos parámetros de soldadura para poder lograr una unión libre de defectos.

Varios autores han centrado sus investigaciones en el uso de diferentes técnicas o métodos para lograr la selección óptima de los parámetros de soldadura y poder optimizar el proceso. (Ref. 18, 19, 20, 22), para nuestro estudio se utilizó una técnica de diseño de experimentos factorial.

1.11.1 Diseño de experimentos factorial

Los diseños factoriales son ampliamente utilizados en experimentos en los que intervienen varios factores para estudiar el efecto conjunto de estos sobre una respuesta. Existen varios casos especiales del diseño factorial general que resultan importantes porque se usan ampliamente en el trabajo de investigación, y porque constituyen la base para otros diseños de gran valor práctico. El más importante de estos casos especiales ocurre cuando se tienen k factores, cada uno con dos niveles. Estos niveles pueden ser cuantitativos como sería el caso de dos valores de temperatura, presión, tiempo, etcétera. También pueden ser cualitativos como sería el caso de dos maquinas, dos operadores, los niveles “superior” e “inferior” de un factor, o quizás, la ausencia o presencia de un factor. Una réplica completa de tal diseño requiere que se recopilen $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones y se conoce como diseño factorial 2^k . El segundo caso especial es el de k factores con tres niveles cada uno, conocido como diseño factorial 3^k .

El diseño 2^k es particularmente útil en las primeras fases del trabajo experimental, cuando es probable que haya muchos factores por investigar. Con lleva el menor número de corridas con las cuales pueden estudiarse k factores en un diseño factorial completo. Debido a que solo hay dos niveles para cada factor, debe suponerse que la respuesta es aproximadamente lineal en el intervalo de los niveles elegidos de los factores. Por otro lado, y como ya se mencionó, el diseño factorial 3^k consta de k factores con tres niveles cada uno. Los factores y las interacciones se representan mediante letras mayúsculas. Los tres niveles de los factores pueden referirse como nivel inferior, intermedio y superior. Estos niveles se representan mediante los dígitos 0 (nivel inferior), 1 (intermedio) y 2 (superior). Cada combinación de tratamientos de un diseño 3^k se representa mediante k dígitos, donde el primero incida en el nivel de A, el segundo en el nivel de B, ... y el k -ésimo dígito, el nivel del factor k . (Ref. 28).

En la presente investigación, para la optimización del cordón de soldadura, se seleccionó un diseño factorial 3^k .

CAPITULO II DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 ANALISIS DE LA PIEZA AUTOMOTRIZ

Como ya se dijo anteriormente, el origen del presente proyecto nace a partir del estudio realizado a dos piezas de aluminio de un componente automotriz, ver figura 2.1, las cuales fueron enviadas al departamento para el análisis de la soldadura debido a que la industria reporta dificultades para unir este tipo de materiales y poder obtener uniones libres de defectos, que cumplan con los requerimientos de calidad especificados. Por tal motivo, primeramente se procedió a cortar las piezas en dirección transversal al cordón de soldadura, para poder observar las principales variables del cordón de soldadura, como son la penetración, ancho y sobremonta, y poder sacar las primeras conclusiones. Posterior a eso, se realizó un análisis químico y metalográfico de dicha pieza para saber el tipo de aleación de aluminio y posteriormente proceder a la adquisición del material y comenzar con el desarrollo del proyecto.



Figura 2.1 Piezas de aluminio suministradas para su estudio

2.2 CARACTERIZACION DE LA ALEACION DE ALUMINIO 6061-T6

La caracterización del material base se efectúa para fines tales como, valorar el material adquirido para tener seguridad plena del tipo de material con el que se está trabajando y corroborar su estado. En este punto se inspeccionó la microestructura de la aleación de aluminio, la composición química y la dureza.

2.2.1 Análisis metalográfico

Como primer paso en el desarrollo de la presente investigación, fue caracterizar el material base desde el punto de vista metalográfico. Para revelar la microestructura de la aleación de aluminio 6061-T6 se cortaron pequeñas muestras del material, las cuales fueron lijadas con papel de carburo de silicio de diferente granulometría, para posteriormente darles un pulido final a espejo, el cual se realizó en una pulidora semiautomática marca BUEHLER ECOMET utilizando pasta de diamante de 6, 3 y 1 μm , respectivamente. Cabe mencionar lo complicado que resulta obtener el pulido a espejo en el aluminio y sus aleaciones debido a que se trata de un material muy suave, por lo cual tiende a rayarse con mucha facilidad, por lo tanto, se debe tener mucho cuidado durante el proceso de pulido. Después del pulido a espejo las muestras fueron atacadas químicamente para el revelado de la microestructura con una solución de Keller (10 ml de ácido clorhídrico, 15 ml de ácido fluorhídrico y 75 ml de agua destilada), durante diferentes tiempos de acuerdo como lo marca la literatura. (Ref. 31). Posteriormente dichas muestras fueron observadas en el microscopio óptico al cual se le adaptó una cámara digital para obtener las micrografías correspondientes.

2.2.2 Análisis químico del material base

Como ya se ha comentado, en el presente proyecto se trabajó con una aleación de aluminio 6061-T6, cuya composición nominal se muestra en la tabla 2.1. (Ref. 30).

Tabla 2.1 Composición química de la aleación de aluminio 6061-T6

MB	% Cu	% Si	% Fe	% Mn	% Mg	% Zn	% Cr	% Ti	% OTROS	% Al
6061-T6	0.15-0.40	0.4-0.8	0.7	0.15	0.8-1.2	0.25	0.15-0.35	0.15	0.15	RESTO

Para comprobar la autenticidad de la aleación de aluminio comprada, se procedió a efectuar un análisis químico certificado de la misma, dicho análisis se realizó en los laboratorios METAL TEST, INC, en la ciudad de Kent, WA (USA).

2.2.3 Microdureza del material base

Una manera de corroborar el estado de un material es por medio de un ensayo de dureza. Para nuestro caso se utilizó un microdurómetro digital marca MITUTOYO conectado a un monitor para la toma de las mediciones, ver figura 2.2, aplicando una carga de 10 gramos por 15 segundos. El mismo equipo y la misma escala se utilizó para las mediciones de microdureza en las uniones soldadas. (Ref. 42)



Figura 2.2 Microdurómetro digital utilizado

2.2.4 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión es el más popular entre los ensayos destructivos y, mediante el cual se pueden conocer una serie de características mecánicas de resistencia de un material tales como elongación, esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, entre otros. Para corroborar las propiedades mecánicas de la aleación 6061-T6 en condición de recibido, se practicaron 2 ensayos de tensión al material base. Por otro lado, para la evaluación del esfuerzo al corte de los cordones de

soldadura, se seleccionaron un total de 9 probetas, tres por cada ángulo de trabajo y con tres diferentes intensidades de corriente y velocidades de avance. Los ensayos tanto para el material base como para las uniones soldadas se realizaron en una maquina universal de la marca ZWICK / ROELL modelo Z₁₀₀, la cual se ilustra en la figura 2.3.



Figura 2.3 Maquina universal de tensión utilizada

La fabricación de las probetas para los ensayos se realizó de acuerdo a la norma ASTM B 557M, cuyo diagrama se ilustra en la figura 2.4. (Ref. 43)

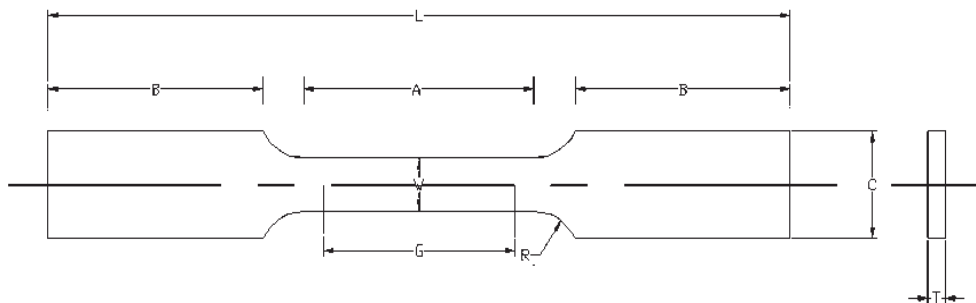


Figura 2.4 Diagrama de las probetas para el ensayo de tensión

2.3 PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

A continuación se detalla todo lo concerniente al procedimiento de soldadura seguido para llevar a cabo las uniones de la aleación de aluminio. Dicho procedimiento incluye la preparación de las juntas a unir, tipos de consumibles, selección correcta de los parámetros del proceso o variables operativas, selección del tipo de diseño de experimentos y el equipo de soldadura utilizado. También se señala la manera en que se midieron las variables y su control durante el proceso.

2.3.1 Preparación de las placas a unir

En base a la pieza automotriz analizada, y tratando de emular lo más posible las condiciones en que fue soldada y para tratar de enmendar los defectos de unión encontrados, se optó por realizar los depósitos de soldadura en juntas a traslape. Las dimensiones y el diseño de las placas de aluminio 6061-T6 se muestran en la figura 2.5. Para tener un mejor manejo de las juntas traslapadas durante el proceso de soldadura, se diseñó un arreglo de placas del mismo material de manera tal que sirvieran como un apoyo o base de las juntas a unir, ver figura 2.6.

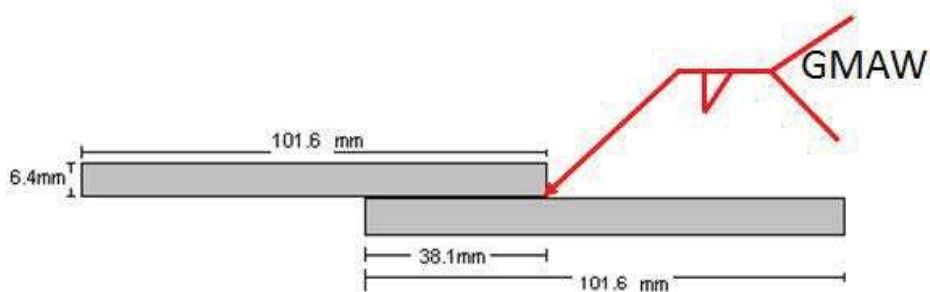


Figura 2.5 Preparación de las placas a unir.

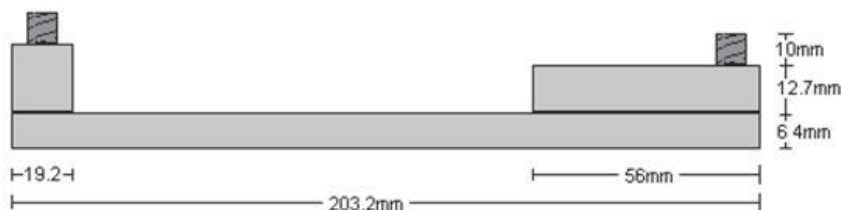


Figura 2.6 Diseño de placas que actuaron como base de las juntas a unir

2.3.2 Selección del material de aporte

Los materiales de aporte comúnmente usados en el soldeo de diversas aleaciones de aluminio, y que son extensamente recomendados y empleados, son el ER4043 (Al-5%Si) y el ER5356 (Al-5%Mg). El uso de tal o cual electrodo dependerá de los resultados que se busquen. En la presente investigación se utilizó el material de aporte ER4043, ya que se ha reportado que con este tipo de material de aporte se obtienen cordones de soldadura con un mejor acabado superficial y mayor penetración. (Ref. 12). La composición química del material de aporte utilizado se muestra en la tabla 2.2. (Ref. 41).

Tabla 2.2 Composición química del material de aporte ER4043

M.A	% Cu	% Si	% Fe	% Mn	% Mg	% Zn	% Cr	% Ti	% Ni	% V	% Al
ER 4043	0.170	4.750	0.240	0.050	0.050	0.100	0.050	0.050	-----	-----	RESTO

2.3.3 Selección del gas de protección

La selección correcta del gas de protección es otro factor determinante en la calidad final de la unión soldada, siendo que el uso de determinado gas o de una combinación de gases, influyen en la penetración y geometría del cordón de soldadura, cuando las demás condiciones se mantienen con un ajuste correcto. En la presente investigación se utilizó argón puro como gas de protección. El argón puro ofrece la ventaja de ser más costo-efectivo que el helio, produce cordones con mayor penetración y un arco más concentrado y enfocado. En la tabla 2.3 se presentan algunas de las características más importantes del argón. (Ref.24, 34)

Tabla 2.3 Características físicas del argón

Gas	Peso molecular (gr/mol)	Gravedad especifica	Densidad (gr/lt)	Potencial de ionización (eV)
Argón (Ar)	39.35	1.38	1.789	15.7

2.3.4 Equipo de soldadura utilizado

Para llevar a cabo la ejecución de la soldadura se utilizó una fuente de poder de corriente directa y potencial constante de la marca MILLER modelo 652, ver figura 2.7. La antorcha de soldadura utilizada fue de la marca MILLER SPOOLMATIC modelo 30A, La cual se sujetó al sistema de avance del equipo de una manera tal que permitiera estar variando el ángulo de trabajo, el cual

fue uno de los parámetros a estudiar durante el desarrollo de la presente investigación. Esta antorcha de soldadura tiene la característica o versatilidad de traer la unidad de alimentación del material de aporte adaptada en la misma antorcha de soldadura, tal como se muestra en la figura 2.8. El depósito de los cordones de soldadura se realizó de una sola pasada en forma semiautomática.



Figura 2.7 Fuente de potencia utilizada



Figura 2.8 Antorcha de soldadura utilizada

2.3.5 Parámetros de soldadura

Los parámetros de soldadura o variables operativas utilizadas para llevar a cabo las diferentes uniones se muestran en la tabla 2.4. Se mantuvieron constantes el voltaje al arco (23 volts), el flujo de gas de protección (22 Lt/min) y de igual manera el Stick Out o extensión libre del electrodo (13mm). De acuerdo a la literatura, los parámetros que tienen mayor influencia sobre el tamaño y geometría del cordón de soldadura son la intensidad de corriente, velocidad de avance y ángulo de trabajo. (Ref.17, 18, 19, 22, 23, 24, 32). Por lo tanto, estos parámetros se estuvieron variando durante la ejecución de las soldaduras.

Tabla 2.4 Parámetros de soldadura

CORRIENTE (Amp.)	V de A (mm/s)	ANGULO (Grados)	VOLTAJE (Volts)	F de G (Lt/min.)	Stick Out (mm)
120, 150, 180	4.5, 5, 5.5	40, 45, 50	23	22	13
120, 150, 180	4.5, 5, 5.5	40, 45, 50	23	22	13
120, 150, 180	4.5, 5, 5.5	40, 45, 50	23	22	13
120, 150, 180	4.5, 5, 5.5	40, 45, 50	23	22	13
120, 150, 180	4.5, 5, 5.5	40, 45, 50	23	22	13
120, 150, 180	4.5, 5, 5.5	40, 45, 50	23	22	13
120, 150, 180	4.5, 5, 5.5	40, 45, 50	23	22	13
120, 150, 180	4.5, 5, 5.5	40, 45, 50	23	22	13
120, 150, 180	4.5, 5, 5.5	40, 45, 50	23	22	13

2.4 SELECCIÓN DEL TIPO DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para evaluar el efecto de los parámetros de soldadura en la forma y geometría del cordón de soldadura y llegar a la optimización del mismo, se seleccionó un diseño factorial con tres niveles (3^k). Éste tipo de diseños plantea los experimentos más adecuados para conocer simultáneamente qué efecto tienen “ k ” factores sobre una respuesta “ y ”, y valorar si hay interacción entre ellos. Como ya se mencionó, el diseño factorial 3^k consta de k factores con tres niveles cada uno. La intensidad de corriente, velocidad de avance de la soldadura y ángulo de trabajo fueron los factores seleccionados. La experimentación más económica y que se ajusta no solo a tendencias lineales, es aquella en que cada factor toma tres valores (niveles), dichos valores son los extremos Y el valor intermedio del dominio experimental (-1, 0 y 1). (Ref. 28). Por lo tanto, el diseño factorial de experimentos quedó como 3^3 , es decir, 27 pruebas de soldadura.

2.4.1 Variables de entrada del diseño de experimentos

Basado en la experiencia previa, revisión bibliográfica y necesidades de experimentación, se determinaron los factores que interesa estudiar y que valores puede tomar el dominio experimental o variables de entrada. En la tabla 2.5 se muestran los factores seleccionados con sus niveles correspondientes.

Tabla 2.5 Variables de entrada del diseño de experimentos

FACTORES	NIVELES		
	-1	0	1
A: Intensidad de corriente	120 A	150 A	180 A
B: Velocidad de avance	4.5 mm/s	5 mm/s	5.5 mm/s
C: Ángulo de trabajo	40°	45°	50°

Una de las novedades del presente trabajo de investigación en el estudio de los parámetros de soldadura sobre la calidad del cordón es la inmiscusión del ángulo de trabajo como variable independiente. En la mayoría de los trabajos realizados únicamente se hace énfasis en la intensidad de corriente y la velocidad de avance. En las figuras 2.9, 2.10, y 2.11 se muestran los tres diferentes ángulos de trabajo utilizados para llevar a cabo las diferentes uniones.

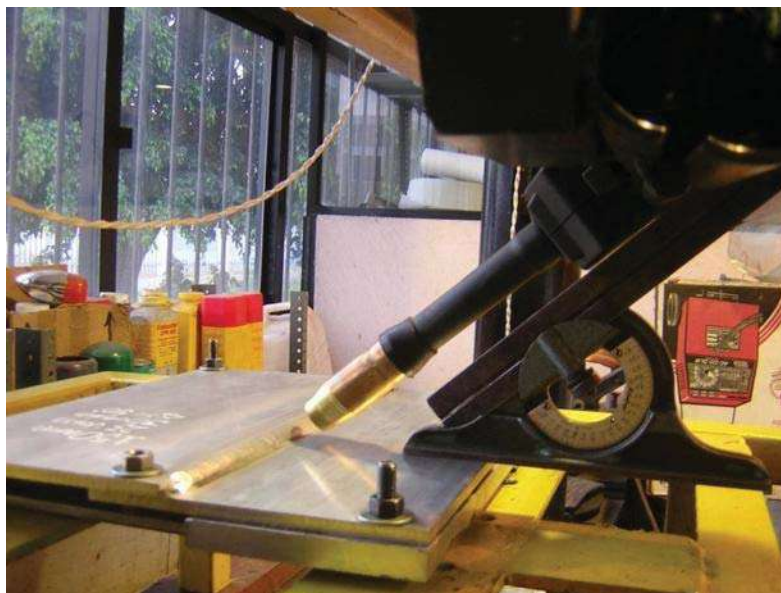


Figura 2.9 Angulo de trabajo de 40°



Figura 2.10 Angulo de trabajo de 45°



Figura 2.11 Angulo de trabajo de 50°

2.4.2 Variables de respuesta del diseño de experimentos

Las variables seleccionadas de respuesta o variables dependientes de la intensidad de corriente, velocidad de avance y ángulo de trabajo, las cuales influyen en el tamaño y forma del cordón de soldadura y su comportamiento mecánico y metalúrgico se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Variables de respuesta del diseño de experimentos

Y ₁	Convexidad del cordón (mm)
Y ₂	Penetración (mm)
Y ₃	Ancho del Cordón (mm)
Y ₄	Aporte térmico (J/mm)

Generalmente la medida de un cordón de soldadura la impone el espesor de la pieza y el tipo de junta a soldar, sean estas uniones a tope o de ángulo, es decir, que en el caso de una unión a tope con ranura, por ejemplo, la medida del cordón será aproximada a la garganta del bisel. Lo mismo ocurre con una junta en ángulo o filete siempre y cuando el espesor de las dos piezas sea igual. La mayoría de los códigos ponen un límite a la cantidad de material depositado, es decir, a la convexidad del cordón de soldadura, en nuestro caso, ya que si el cordón presenta una convexidad excesiva o exceso de material depositado, como se había comentado anteriormente, puede existir peligro de rotura de la soldadura al aparecer zonas de concentración de esfuerzos. (Ref. 20, 44). Por tal motivo, se hace énfasis en esta variable del cordón de soldadura.

Por otro lado, el ancho del cordón y la profundidad de penetración son también variables muy importantes, ya que junto con la convexidad darán determinadas formas geométricas al cordón de soldadura y por ende, determinadas propiedades mecánicas. (Ref.17, 18, 19, 20, 21, 22, 23,).

El aporte térmico también es otro parámetro muy importante en el que se hizo hincapié durante la presente investigación. Puesto que el tamaño de la zona afectada térmicamente, la microestructura de la zona fundida y de la zona afectada térmicamente y el tamaño y forma del cordón de soldadura dependen en gran parte del aporte térmico utilizado para llevar a cabo las uniones. De acuerdo al diseño de experimentos seleccionado, en total se utilizaron nueve diferentes aportes térmicos.

2.4.3 Matriz experimental: diseño factorial 3³

En la tabla 2.7 se muestra la matriz experimental que se obtiene combinando de manera aleatoria los tres niveles de los tres factores. Para evaluar el efecto del dominio experimental seleccionado sobre la forma y tamaño del cordón de soldadura se procedió a la medida de la convexidad o sobremonta, la penetración y el ancho del cordón de soldadura.

Se reportó también el calor aportado para cada cordón. El procesamiento de los datos y obtención de los resultados de acuerdo al diseño de experimentos se realizó mediante el programa estadístico STATGRAPHIS plus 4.1

Tabla 2.7 Matriz experimental

#	AMPERAJE (A)	V.A (mm/s)	ANGULO (Grados)	CONVEXIDAD (mm)	PENETRACION (mm)	ANCHO (mm)	HI (J/mm)
1	180	5	45				
2	150	5.5	45				
3	150	4.5	45				
4	180	5.5	45				
5	120	5.5	50				
6	120	4.5	45				
7	150	4.5	50				
8	150	5	50				
9	180	4.5	45				
10	120	4.5	50				
11	120	5	45				
12	150	5	45				
13	180	4.5	50				
14	120	5.5	45				
15	180	5.5	40				
16	180	5	40				
17	120	5.5	40				
18	180	5.5	50				
19	120	4.5	40				
20	150	5	40				
21	120	5	40				
22	180	4.5	40				
23	150	5.5	40				
24	150	5.5	50				
25	150	4.5	40				
26	180	5	50				
27	120	5	50				

2.4.4 Obtención de los resultados (variables dependientes)

Como se ha venido comentando, la geometría del cordón en los procesos de soldadura de arco eléctrico es un factor muy importante en la determinación de las características mecánicas de la unión. Por tal razón, en la presente investigación el objetivo principal es la optimización del

cordón, es decir, encontrar el mejor perfil de soldadura para unas condiciones dadas, todo esto por medio de la selección correcta de los parámetros operativos del proceso. Las mediciones de la convexidad del cordón, ancho y profundidad de penetración se realizaron a través del analizador de imágenes SigmaScan Pro Versión 5.0. En la figura 2.12 se ilustran las zonas o variables de la geometría del cordón que fueron medidas.

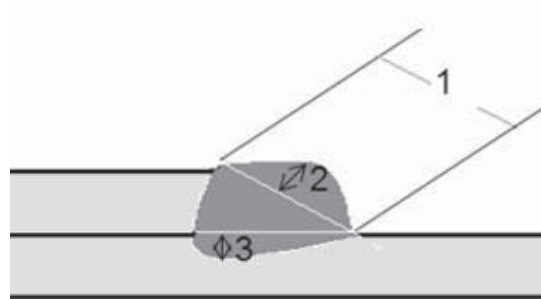


Figura 2.12 Variables del cordón de soldadura analizadas, 1: ancho, 2: convexidad y 3: profundidad de penetración.

El calor aportado al material base en un proceso de soldadura por arco eléctrico depende del valor de diferentes parámetros, no obstante se considera que la intensidad de corriente y el avance de la soldadura son los que tienen mayor incidencia. El registro del aporte térmico se realizó mediante la ecuación 2.1. (Ref. 32).

$$EL = \frac{U_a \cdot I_s \cdot \beta}{V_s} \text{-----2.1}$$

Donde:

EL - Energía lineal de soldadura – (J/mm).

U_a - Voltaje – (Volts).

I_s - Intensidad de corriente – (Amperes).

β - Aprovechamiento del calor en el proceso, para el caso de GMAW es de 0.80.

V_s - Avance de soldadura - (cm/min).

2.5 ANÁLISIS DE LAS FRACTURAS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

De forma complementaria, se determinó realizar un análisis a las probetas fracturadas tanto del material base como de las uniones soldadas, con la finalidad de describir el tipo de fractura obtenido y la composición de posibles intermetálicos encontrados. Ambos estudios fueron realizados en un microscopio electrónico de barrido de la marca JEOL modelo JSM-6400. Los modos de imagen empleados fueron electrones secundarios, a diferentes aumentos.

2.6 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA

Con el objetivo de registrar los ciclos térmicos de soldadura en la zona afectada térmicamente para diferentes aportes térmicos utilizados, se realizó un barrido de medición de la temperatura en 4 puntos correspondientes a la zona afectada por el calor, para lo cual se emplearon termopares tipo K, colocados a una profundidad de 3 mm y una distancia entre cada uno de 4 mm, tal como se indica en la figura 2.13. Para la toma de las lecturas se utilizó una tarjeta de adquisición de datos de la marca NACIONAL INSTRUMENT modelo NI USB- 9162 conectada a una computadora personal.

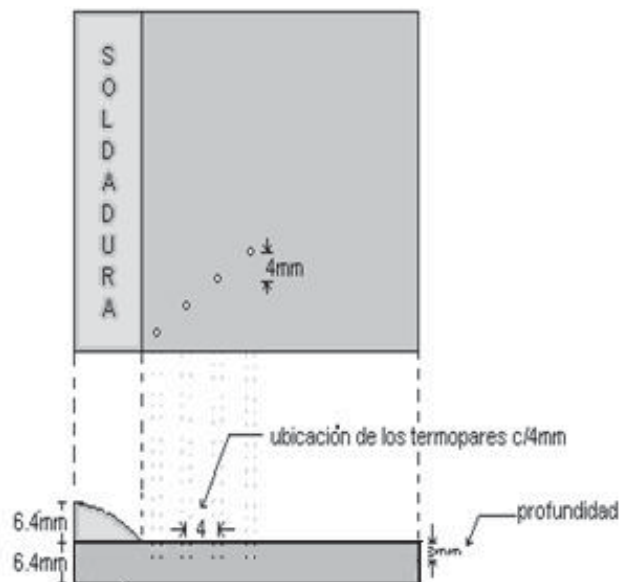


Figura 2.13 Ubicación de los termopares

CAPITULO III ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

3.1 ANÁLISIS DE LA PIEZA AUTOMOTRIZ

3.1.1 Composición química

En la tabla 3.1 se muestran los resultados del análisis químico realizado a la pieza automotriz de aluminio, en donde se puede observar que los elementos aleantes contenidos en mayor porcentaje son el magnesio (Mg) y el silicio (Si), respectivamente. Dichos porcentaje de Mg y Si caen dentro de la familia de las aleaciones de Al-Mg-Si (serie 6XXX). (Ref. 29).

Tabla 3.1 Composición química de la pieza automotriz

% Cu	% Si	% Fe	% Mn	% Mg	% Zn	% Cr	% Ni	% Ti	% Pb	% V	% Al
0.010	0.414	0.160	0.005	0.832	0.002	0.005	0.000	0.010	0.002	0.004	98.7

Laboratorios METAL TEST, INC, WA (USA).

3.1.2 Microestructura

Una vez realizado el análisis químico de la pieza automotriz se procedió a la caracterización de la misma por medio de microscopía óptica. En la figura 3.1 se presenta la micrografía de material obtenida, en la cual se alcanza a percibir la morfología y el tamaño de grano de la aleación de aluminio, así como también se alcanzan a visualizar partículas redondas de Mg_2Si . (Ref. 29).

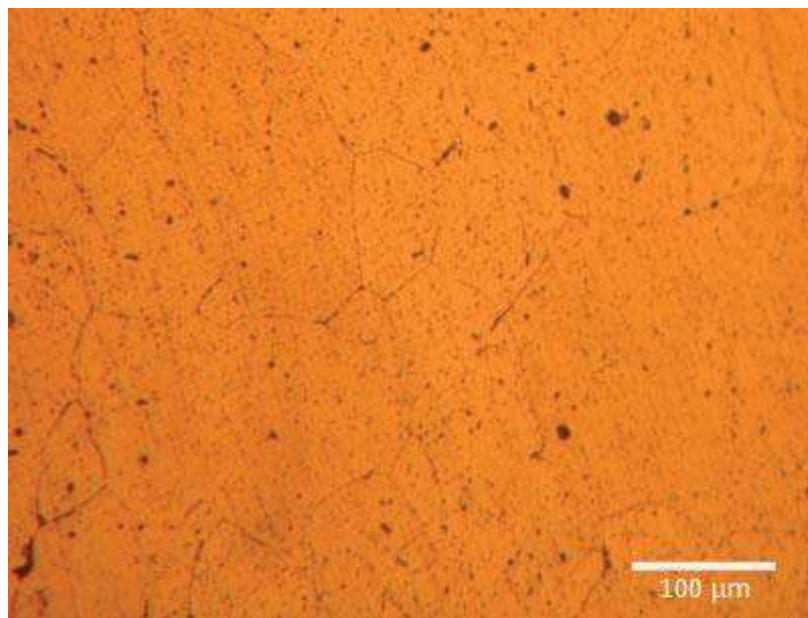


Figura 3.1 Micrografía obtenida de la pieza automotriz

3.1.3 Análisis del cordón de sol

dadura

Como ya se comentó anteriormente, para el estudio del cordón de soldadura las piezas del componente automotriz fueron seccionadas, ver figura 3.2, y las muestras obtenidas fueron macroatacadas para poder observar a detalle la calidad de la unión. En la figura 3.3 se presenta una de las muestras obtenidas de la unión soldada y donde se puede apreciar que el cordón de soldadura presenta defectos tales como falta de penetración, falta de fusión, acumulación lateral del material aportado y una convexidad excesiva. Lo cual se atribuye a la mala selección de los parámetros operacionales y deficiente técnica de soldabilidad. El mismo comportamiento se observa casi a lo largo de todo el cordón. En la tabla 3.2 se presentan las variables de la geometría del cordón que fueron analizadas.



Figura 3.2 Seccionamiento de la piezas

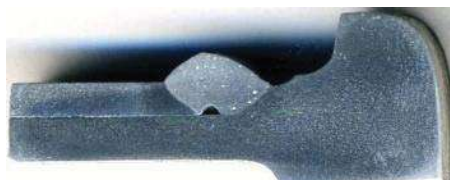


Figura 3.3 Macrografía del corón de soldadura

Como se puede observar, de acuerdo al espesor del material y ancho del cordón, la unión presenta una convexidad excesiva, lo cual es inaceptable ya que las propiedades mecánicas de la unión pueden disminuir debido a la presencia de puntos o zonas de concentración de esfuerzos. (Ref. 41, 44). Este defecto es atribuido a una velocidad de avance de la soldadura demasiado baja, lo cual produce un abultamiento del cordón, con la consiguiente menor penetración, y más anchura del cordón. (Ref. 24, 32).

Tabla 3.2 Variables de la geometría del cordón medidas

Ancho del cordón	10 mm
convexidad	3 mm
Profundidad de penetración	0 mm

La falta de fusión y penetración se atribuye a un ángulo de desplazamiento demasiado grande, orientación inadecuada del electrodo, intensidad insuficiente, velocidad de avance excesiva, limpieza inadecuada, etc. Por otro lado, la acumulación lateral del material aportado (cordón ligeramente cargado a un extremo), se debe al uso incorrecto del ángulo de trabajo. (Ref. 32). Aunado a estos defectos de soldadura, el cordón presenta también una gran cantidad de poros, tal como se observa en la figura 3.4.

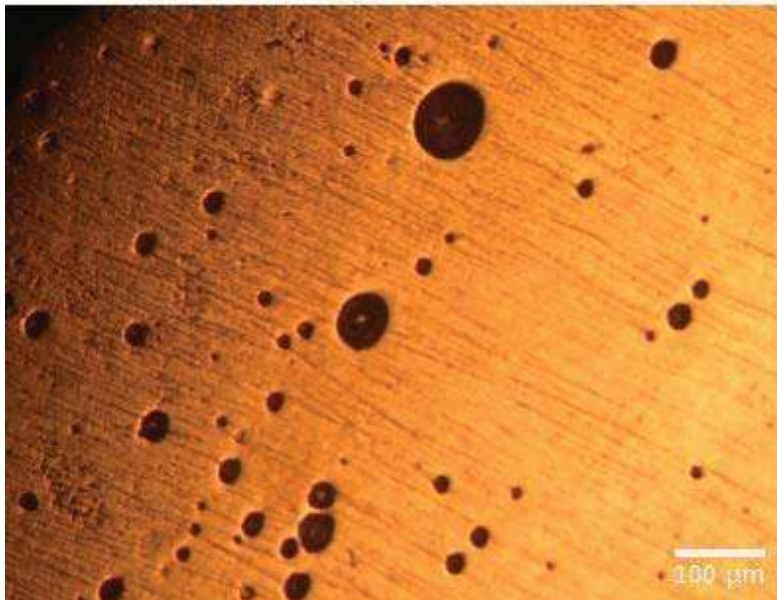


Figura 3.4 Porosidad presente en el cordón de soldadura

Como se recordará, la porosidad es el problema más frecuente que se presenta en la soldadura del aluminio y sus aleaciones. Un exceso de poros en un cordón de soldadura es un defecto grave, puesto que reduce las propiedades mecánicas de resistencia a la tensión y de impacto, por disminuir el área efectiva de la sección transversal. Por otro lado, en un elemento sometido a cargas cíclicas como dicho componente automotriz, los poros reducen la resistencia a la fatiga ya que funcionan como puntos iniciadores de falla (Ref. 44). El problema de la porosidad se puede disminuir con una preparación adecuada de las piezas a unir y una técnica correcta de soldadura. La preparación adecuada incluye la limpieza de las partes a soldar, se debe remover toda sustancia u óxido que sirva de fuente de origen del hidrógeno u otro contaminante. Como ya se mencionó, los orígenes del hidrógeno pueden ser grasas, aceites y solventes contenidos en la superficie del metal, por lo tanto, su remoción antes de la soldadura es clave. Por otro lado, se deben revisar las condiciones de operación que puedan resultar en una mala protección al metal de soldadura de los gases de la atmósfera, dichas condiciones incluyen el caudal del gas protector, longitud de arco y ángulo de desplazamiento.

Por todo lo anterior, en el presente trabajo de investigación se decidió estudiar el efecto de los parámetros de soldadura en juntas a traslape de una aleación de aluminio 6061-T6 sobre la geometría del cordón de soldadura para llegar a la optimización del mismo.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6

3.2.1 Análisis químico

La composición química de la aleación de aluminio 6061-T6, con la cual se trabajó en la presente investigación se muestra en la tabla 3.3. Como ya se comentó, dicho análisis se realizó para tener la certificación del tipo material con el cual se trabajaría.

Tabla 3.3 Composición química de la aleación 6061-T6

MB	% Cu	% Si	% Fe	% Mn	% Mg	% Zn	% Cr	% Ni	% Ti	% Pb	% V	% Al
6061-T6	0.264	0.659	0.266	0.049	1.203	0.041	0.047	0.003	0.016	0.002	0.001	97.3

3.2.2 Microestructura

En la figura 3.5 se muestra la microestructura del material base 6061-T6, en la cual se puede observar una estructura de granos equiaxiales formados a partir del tratamiento térmico de solubilización y envejecimiento que se aplica a este tipo de aleaciones de aluminio con la finalidad de obtener mejores propiedades mecánicas. Además, se aprecia la orientación preferencial de los granos producto del proceso de rolado. (Ref. 30, 31).

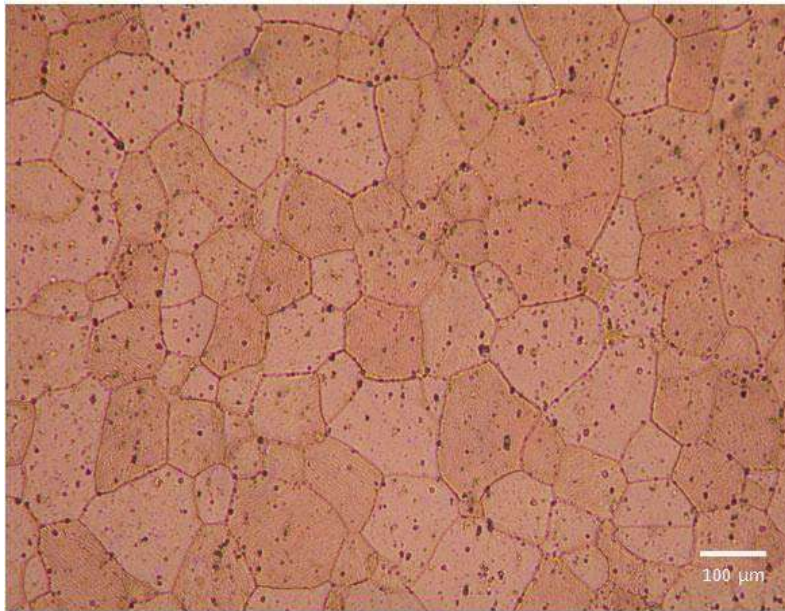


Figura 3.5 Microestructura de la aleación de aluminio 6061-T6

3.2.3 Microdureza

En la tabla 3.4 se muestran los resultados de microdureza practicados al material base 6061-T6. Se realizaron aproximadamente 10 indentaciones en diferentes zonas de una muestra de la aleación, dando como resultado una dureza promedio de 106.6 Hv_{10} . El ensayo de microdureza sirve entre otros propósitos, para corroborar el estado de tratamiento de la aleación.

Tabla 3.4 Microdureza del material base

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DUREZA, Hv_{10}	103	98.1	112	110	100	108	114	99.5	106	116

3.3 ANALISIS DE LAS UNIONES SOLDADAS

3.3.1 Inspección visual

En la figura 3.6 se muestra la apariencia del cordón de soldadura de una de las uniones realizadas con un ángulo de trabajo de 40° y donde se puede observar una uniformidad del mismo a lo largo de la unión. Dicha soldadura fue realizada con una velocidad de avance de 5.5 mm/s (32 cm/min) y una intensidad de corriente de 180A. Por otro lado, en la figura 3.7 se muestra un corte transversal de la misma unión, y en la cual se puede ver que el cordón presenta problemas de convexidad excesiva, falta de penetración y acumulación lateral del material depositado. Las figuras 3.8 y 3.9 muestran respectivamente la apariencia superficial y el perfil del cordón de otra soldadura realizada con un ángulo de trabajo de 40° pero con menor aporte térmico, apreciándose un cordón con menor altura o convexidad en comparación con el anterior, pero con el mismo defecto de falta de penetración. Los mismos problemas y misma tendencia del cordón fueron observadas en las demás uniones realizadas con este ángulo de trabajo.



Figura 3.6 Apariencia superficial de placa soldada con ángulo de 40° , 5.5 mm/s y 180A.



Figura 3.7 Perfil transversal del cordón de soldadura obtenido con 40°, 5.5 cm/min y 180A



Figura 3.8 Acabado superficial de la soldadura realizada con ángulo de 40°, 5.5 mm/s y 150A



Figura 3.9 Perfil transversal de unión realizada con 40°, 150 A y 5.5 mm/s.

Siguiendo con la inspección visual de algunas de las uniones soldadas, en la figura 3.10 se muestra la unión obtenida con una intensidad de corriente de 150 A, una velocidad de avance de la soldadura de 4.5 mm/s (28 cm/min) y un ángulo de trabajo de 45°. Como se ha mencionado, el voltaje se mantuvo constante en todas las uniones (23 Volts). Dicha unión presenta un acabado superficial bueno y uniforme, sin ningún tipo de posible solapado. Este comportamiento del cordón fue observado en casi todas las uniones realizadas con mencionado ángulo de trabajo. En la figura 3.11 se presenta el perfil transversal del cordón correspondiente a la soldadura presentada en la figura 3.10, observándose una gran mejoría en la penetración de la soldadura en

comparación con la unión obtenida con los mismos parámetros pero con un ángulo de 40°. Esta mejoría en la calidad de las uniones con ángulo de trabajo de 45° fue en mayor o menor proporción de acuerdo a las velocidades de avance e intensidades de corriente utilizadas.



Figura 3.10 Apariencia del cordón en unión realizada con ángulo de 45°, 150 A y 4.5 mm/s.



Figura 3.11 Perfil del cordón obtenido con 45°, 150 A y 4.5 mm/s.

Por otro lado, las juntas soldadas con ángulo de trabajo de 50° también mostraron una notable mejor apariencia en sus cordones de soldadura, aunque no tan marcada como las uniones hechas con el ángulo de 45°, si fueron mejores que las obtenidas con el ángulo de 40°, tal como se puede observar en las figuras 3.12 y 3.13, en donde se puede apreciar un cordón con buen acabado superficial y excelente uniformidad, sin problemas de abultamiento o convexidad excesiva, solapes y falta de penetración.

De acuerdo con la figura 3.13, podemos decir que a medida que se fue incrementando el ángulo de trabajo, se fue mejorando la concentración del calor en el punto de aplicación, logrando con

ello una mejor repartición entre las dos placas del material depositado, reduciéndose el problema de acumulación lateral del material aportado el placa superior.

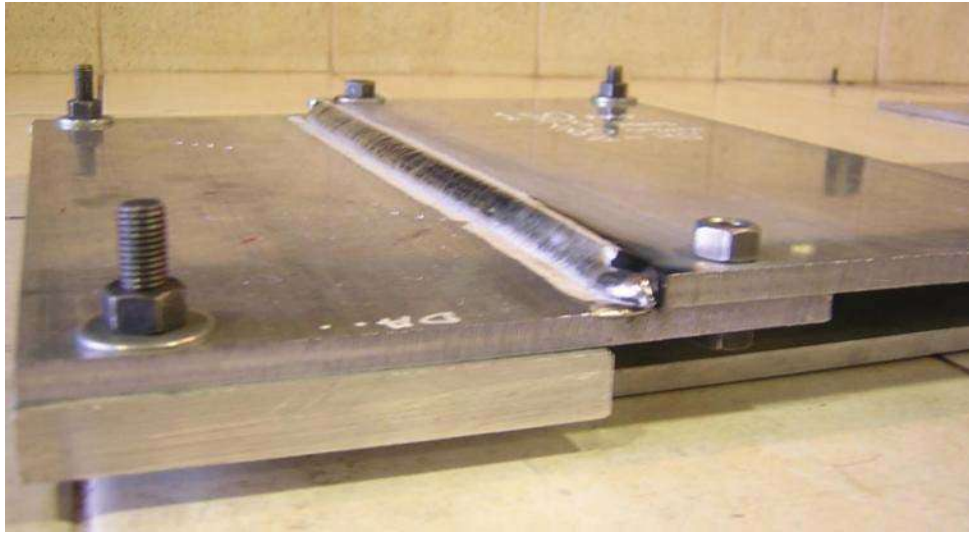


Figura 3.12 Apariencia de una soldadura obtenida con un ángulo de 50°, 150 A y 30 cm/min.



Figura 3.13 Corte transversal del cordón de soldadura obtenido con un ángulo de 50°, 150 A y 30 cm/min

Como se puede observar, el uso de determinado ángulo de trabajo en una soldadura de filete es demasiado importante para obtener una determinada calidad del cordón de soldadura. Dicho efecto sobre la calidad del cordón se observó mayor que los parámetros operacionales de intensidad de corriente y velocidad de avance de la soldadura. De acuerdo con la inspección visual realizada a las diferentes placas soldadas, las uniones que presentaron un mejor acabado superficial y una mejor geometría del cordón fueron las realizadas con un ángulo de trabajo de 45°.

Por otro lado, en lo compete al análisis de la calidad del cordón desde el punto de vista del aporte térmico, se pudo observar que la mayoría de las uniones realizadas con un amperaje de 120 presentan defectos tales como solapado y falta de fusión, ver figura 3.14, esto sin hacer caso del

ángulo de trabajo utilizado, y lo cual se debe a que el arco eléctrico no fundió suficientemente a las placas base, producto de un aporte térmico insuficiente. (Ref. 32, 24).

3.3.2 Inspección con líquidos penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes fue utilizada únicamente para resaltar los defectos superficiales de las uniones soldadas y como una extensión del método de inspección visual. En la figura 3.14 se presentan dos de las uniones realizadas con las menores intensidades de soldadura y en las cuales se pueden observar con mayor claridad los defectos mencionados anteriormente, es decir, falta de fusión y solapes a lo largo del cordón de soldadura. Para corroborar que estos tipos de defectos de soldadura se deben a bajos aportes térmicos se presenta la figura 3.15 en la cual se puede observar una sanidad del cordón a lo largo y ancho de las uniones. Dichas soldaduras fueron realizadas con amperajes más grandes (150 y 180 A), la misma calidad del cordón se presenta en las demás uniones realizadas con estos parámetros.



Figura 3.14 Defectos superficiales de uniones realizadas con 120 A.



Figura 3.15 Calidad del cordón en uniones realizadas con altos aportes

3.3.3 Matriz de experimentos: diseño factorial 3^3

En la tabla 3.5 se muestra la matriz experimental resultante, la cual se obtuvo a partir de la combinación de manera aleatoria de las variables independientes (amperaje, velocidad de avance y ángulo de trabajo) con sus tres niveles de variación y el registro de las variables de respuesta (convexidad del cordón, penetración, ancho y aporte térmico).

Tabla 3.5 Matriz experimental resultante

#	AMPERAJE (A)	V.A (mm/s)	ANGULO (Grados)	CONVEXIDAD (mm)	PENETRACION (mm)	ANCHO (mm)	HI (J/mm)
1	180	5	45	0	3.2	10	662.4
2	150	5.5	45	1.5	1.6	9.7	501.81
3	150	4.5	45	1	2.3	10.4	613.33
4	180	5.5	45	0.6	3	10.3	602.18
5	120	5.5	50	0	0	7.05	401.45
6	120	4.5	45	0	0	6.85	490.66
7	150	4.5	50	3	1.4	11.1	613.33
8	150	5	50	3.1	1.2	10.3	555
9	180	4.5	45	2.6	1.9	10.9	736.4
10	120	4.5	50	0	0	7.6	490.66
11	120	5	45	0	0	6.4	441.6
12	150	5	45	1.35	2.2	10.4	555
13	180	4.5	50	2.7	1.6	13.5	736
14	120	5.5	45	0	0	6.4	401.45
15	180	5.5	40	2.7	0	12.45	602.18
16	180	5	40	3.5	0	13.5	662.4
17	120	5.5	40	0	0	7.3	401.45
18	180	5.5	50	2.7	1.3	11.5	602.18
19	120	4.5	40	0	0	8.5	490.66
20	150	5	40	3	0	11.3	555
21	120	5	40	0	0	8.1	441.6
22	180	4.5	40	3.8	0	13.75	736
23	150	5.5	40	2.9	0	10	501.81

24	150	5.5	50	2.8	0.95	9	501.81
25	150	4.5	40	3.05	0	12	613.33
26	180	5	50	2.3	1.8	11.6	662.4
27	120	5	50	0	0	7.9	441.6

3.3.3.1 Análisis del aporte térmico

Para poder entender de mejor manera el efecto de los parámetros operacionales sobre las variables de la geometría del cordón de soldadura, primeramente comenzaremos con el análisis del aporte térmico. Como se puede observar en la tabla 3.5, en nuestro trabajo experimental se utilizaron nueve diferentes aportes térmicos, registrados a partir de la ecuación 2.1 y utilizados de acuerdo al diseño experimental. Como se mencionó en el capítulo anterior, la energía lineal aportada a la pieza de trabajo producto del proceso de soldadura depende principalmente de la intensidad de corriente y velocidad de avance de la soldadura. En la figura 3.16 se muestra la relación existente entre las tres variables de entrada de nuestro sistema y el aporte térmico. De acuerdo con el gráfico de la figura 3.16, en la medida que se incrementa la intensidad de corriente (amperaje) se incrementa el aporte térmico, por el contrario al aumentar la velocidad de avance de la soldadura el calor aportado al material base disminuye. También se puede ver que la orientación del electrodo o ángulo de trabajo no tiene ningún efecto sobre el aporte térmico, es decir, para cualquier ángulo de trabajo utilizado el aporte térmico no varía.

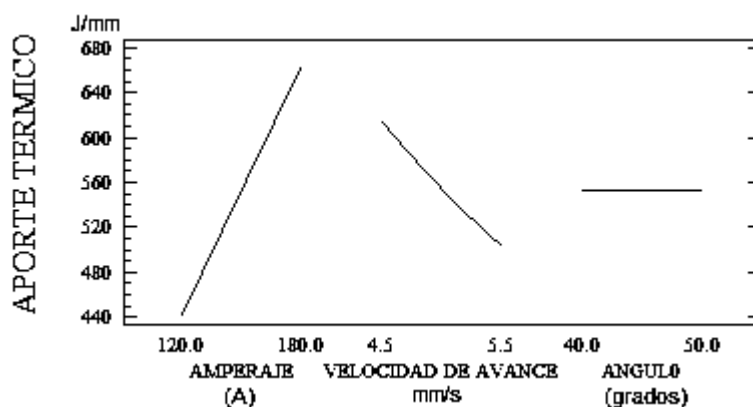


Figura 3.16 Efecto de la variables de entrada del diseño experimental sobre el aporte térmico

Ahora bien, analizando de manera conjunta la relación amperaje-velocidad de avance sobre el aporte térmico (figura 3.17), se puede observar que el mayor aporte térmico alcanzado (720-760

J/mm) se obtiene con el mayor amperaje y menor velocidad de avance, y viceversa, la mayor velocidad de avance y menor amperaje registran el menor aporte térmico (400-440 J/mm).

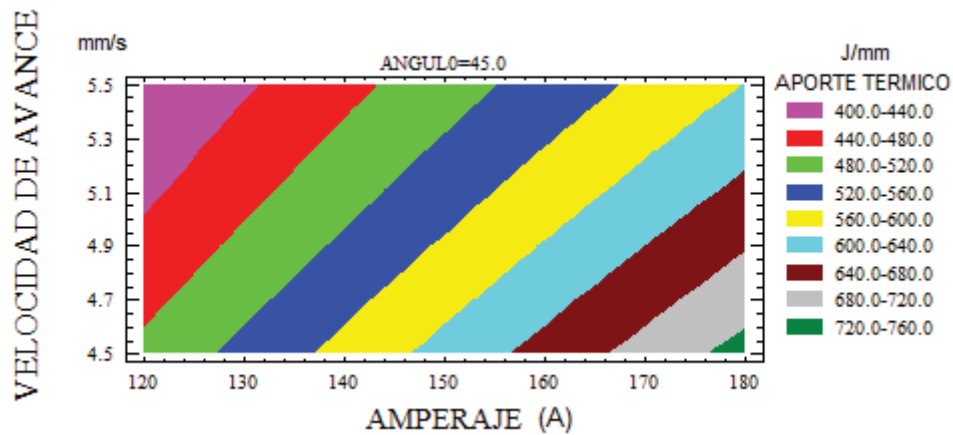


Figura 3-17 Contornos de superficie de respuesta estimada para el aporte térmico

Por otro lado, la magnitud del aporte térmico no solo tiene influencia en la geometría del cordón de soldadura, sino también en su microestructura, (Ref. 40), la cual también será analizada posteriormente.

3.3.3.2 Comportamiento de la convexidad del cordón

Como se ha venido comentando, el exceso de material depositado o convexidad excesiva (para el caso de una soldadura de filete), es considerado como un defecto de soldadura ya que las propiedades mecánicas de la unión se ven afectadas debido a la existencia de zonas de concentración de esfuerzos. (17, 18, 20, 21, 22, 44). Por lo tanto, la convexidad del cordón de soldadura se consideró como una variable dependiente en el diseño de experimentos. En la figura 3.17 se muestra la tendencia que tiene cada una de las tres variables de entrada de nuestro diseño de experimentos sobre la convexidad del cordón de soldadura. En forma general se puede observar que a medida que aumenta la intensidad de corriente de la soldadura aumenta la altura del cordón, más adelante se explicará un poco más detalle del porque de esta situación. Por otro lado, recordando el efecto que tiene la velocidad de avance de la soldadura sobre el tamaño y forma del cordón, se puede decir que la convexidad es la mayor con la menor velocidad de avance de la soldadura producto de una mayor cantidad de material que se deposita en la pieza de trabajo por unidad de longitud. (Ref. 1, 24, 32). Como ya fue comentado y analizado en el apartado de la inspección visual de las soldaduras, los cordones con menor penetración y, por

ende los más convexos fueron los realizados con el ángulo de trabajo de 40°. Por el contrario los cordones menos convexos fueron los que se hicieron con un ángulo de 45°.

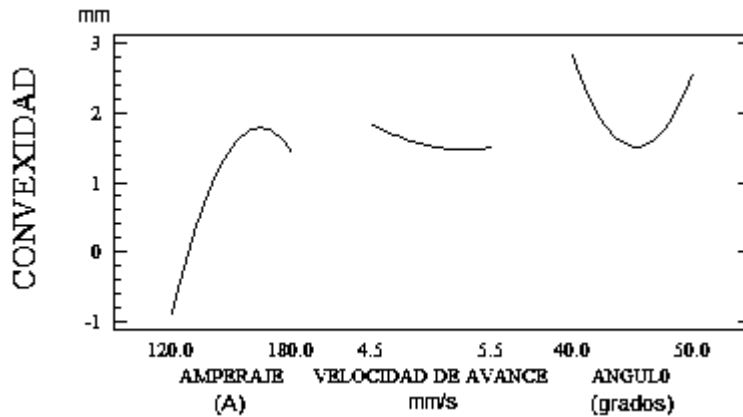


Figura 3.17 Comportamiento de cada factor sobre la convexidad del cordón de soldadura

La ecuación de regresión resultante que relaciona la convexidad del cordón en función de la intensidad de corriente, velocidad de avance de la soldadura y ángulo de trabajo es la siguiente:

$$\text{CONVEXIDAD} = 65.9611 + 0.598981(A) - 5.65278 (V.A) - 4.29944 (\acute{A}) - 0.00138889(A)^2 - 0.0172222(A) (V.A) - 0.00127778 (A) (\acute{A}) + 0.633333 (V.A)^2 + 0.035 (V.A) (\acute{A}) + 0.0476667 (\acute{A})^2 \text{-----EC. 3.1}$$

DONDE:

A = Intensidad de corriente (A)

V.A = Velocidad de avance de la soldadura (mm/s)

∠ = Angulo de trabajo (grados)

A partir de esta relación y sobre la base de diferentes valores tomados por las variables de entrada del diseño de experimentos es posible predecir la altura o convexidad del cordón de soldadura. La representación grafica de los resultados en correspondencia a la ecuación de regresión 3.1 se muestra en la figura 3.18, en la cual se puede apreciar una amplia gama de valores para el análisis de la convexidad del cordón en función de la intensidad de corriente, velocidad de avance de la soldadura y ángulo de trabajo.

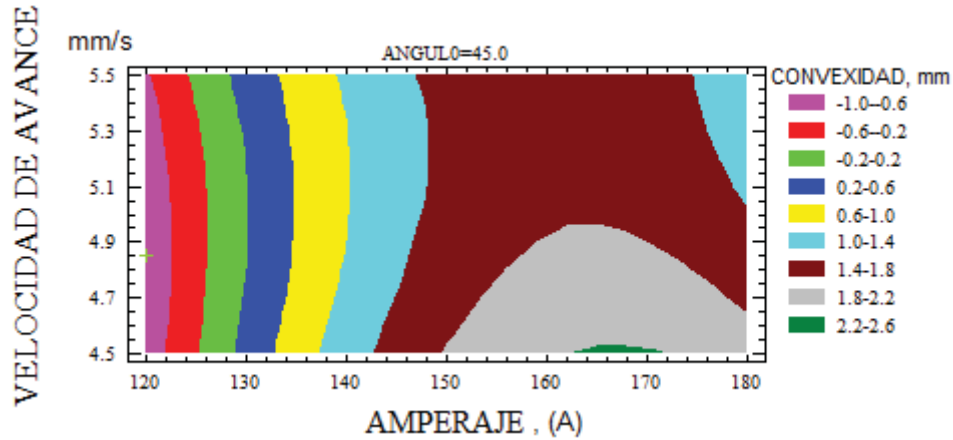


Figura 3.18 Contornos de superficie de respuesta estimada para la convexidad del cordón

Como se puede observar en la figura 3.18, para intensidades de corriente de 120 amperes existen valores negativos de convexidad, en realidad los valores de estos cordones de soldadura no fueron registrados puesto que no cumplieron con el tamaño de filete que se especifica (Ref.24, 41), por lo tanto, no fueron tomados en cuenta para el estudio de esta variable de la geometría del cordón de soldadura. En realidad el análisis de la convexidad del cordón comienza a partir de los 150 amperes y donde se puede observar que a elevadas intensidades de corriente y bajas velocidades de avance de la soldadura, es decir, a elevados aportes térmicos la convexidad del cordón aumenta con la consiguiente menor penetración y mas anchura del cordón, tal como de muestra en la figuras 3.19 a) y 3.19 b) debido a un aumento en la cantidad de material depositado, lo cual conlleva a un abultamiento del cordón de soldadura.

Dicho efecto de la intensidad de corriente y velocidad de avance sobre la altura o convexidad del cordón es reportado en el trabajo correspondiente a la referencia 23.

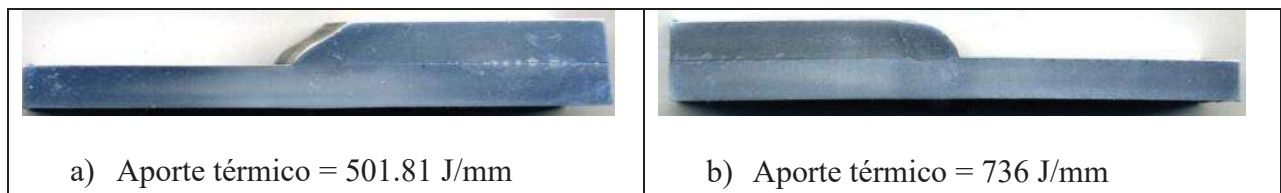


Figura 3.19 Efecto del aporte térmico en la convexidad del cordón

Como ya se ha comentado, el control de la cantidad de material aportado en una unión es muy importante, sobre todo si esta va a estar sometida esfuerzos dinámicos, tal como se reportó en la investigación realizada por C.A. Bloem (Ref. 21), donde se evaluaron diferentes acabados de la morfología del cordón de soldadura en uniones de aluminio 7020 y en las cuales se encontraron los peores resultados de resistencia a la fatiga en aquellas uniones con mayor sobremonta. Por lo tanto, se considera que un cordón de soldadura óptimo es aquel que menos refuerzo o convexidad tiene. En la tabla 3.6 se presentan las condiciones obtenidas mediante la optimización del proceso experimental para lograr la menor convexidad de los cordones de soldadura.

Tabla 3.6 Optimización del diseño experimental para minimizar la convexidad del cordón

Meta: Minimizar CONVEXIDAD			
Factor	Bajo	Alto	Optimo
AMPERAJE (A)	120	180	150
VELOCIDAD DE AVANCE(mm/s)	4.5	5.5	4.8
ANGULO (grados)	40	50	44.9

3.3.3.2 Comportamiento del ancho del cordón

Otra de las variables importantes de la geometría del cordón de soldadura y que depende de las variables de entrada del diseño de experimentos es el ancho del cordón, el cual también tiene una influencia importante en la calidad final de la unión, ya que junto con la convexidad y penetración darán determinadas geometrías al cordón de soldadura y por ende, determinadas propiedades mecánicas. En la figura 3.20 se muestra el comportamiento individual del amperaje, velocidad de avance y ángulo de trabajo sobre el ancho del cordón de soldadura. Donde se puede apreciar, que el ancho del cordón es directamente proporcional a la intensidad de corriente e inversamente proporcional a la velocidad de avance de la soldadura.

Por otro lado, se puede observar que el ángulo de trabajo utilizado para llevar a cabo las uniones de soldadura tiene una influencia importante en la magnitud del ancho del cordón. De acuerdo con la figura 3.20, los cordones realizados con una orientación del electrodo de 45° presentaron una tendencia a ser más angostos en comparación con los realizados con los otros dos ángulos.

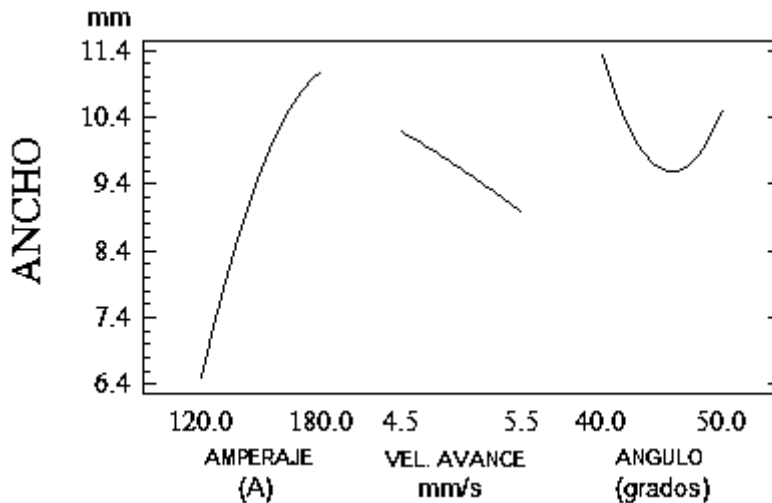


Figura 3.20 Comportamiento individual de las variables de entrada sobre en ancho del cordón

La ecuación 3.2 obtenida a partir del diseño experimental nos representa la relación existente entre en ancho del cordón y las variables independientes del proceso, es decir, la intensidad de corriente, velocidad de avance de la soldadura y ángulo de trabajo del electrodo, y con la cual se puede predecir un ancho del cordón para un valor tomado por dichas variables independientes. La representación grafica de esta función se muestra en la figura 3.21.

$$\text{ANCHO} = 75.5032 + 0.441713(A) + 1.98611 (V.A) - 4.66083 (\acute{A}) - 0.00091358 (A)^2 - 0.00944444(A) (V.A) - 0.000972222(A) (\acute{A}) - 0.155556 (V.A)^2 - 0.005 (V.A) (\acute{A}) + 0.0527778 (\acute{A})^2 \text{-----EC.3.2}$$

DONDE:

A = Intensidad de corriente (A)

V.A = Velocidad de avance de la soldadura (mm/s)

∠ = Angulo de trabajo (grados)

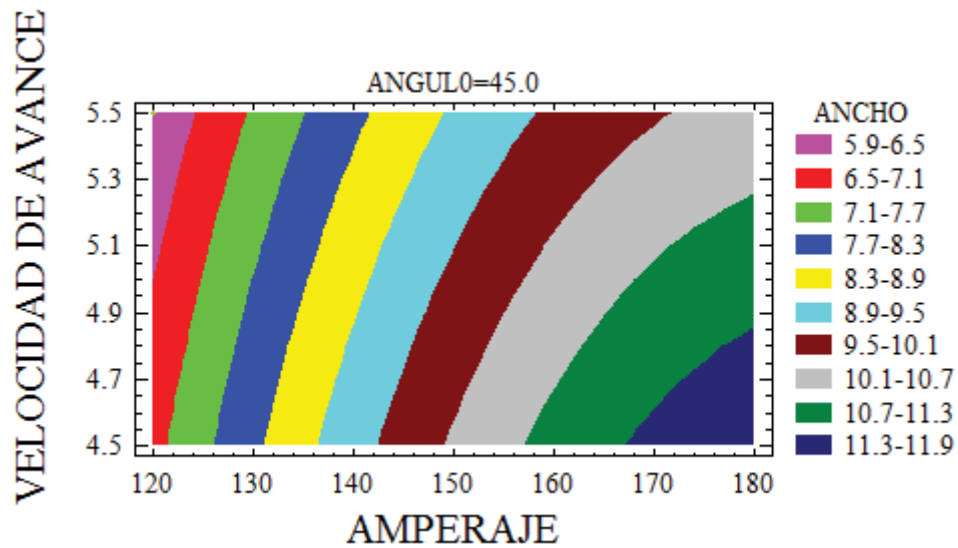


Figura 3.21 Contornos de superficie de respuesta estimado para el ancho de cordón

Resulta significativo que en la medida que disminuye la intensidad de corriente (amperaje) y se incrementa la velocidad de avance de la soldadura, se reduce apreciablemente el ancho del cordón. En caso contrario, se presentan los mayores valores para el ancho del cordón cuando la intensidad de corriente es máxima (180 A) y la velocidad de avance toma el valor más bajo (4.5 mm/s), es decir, que en la medida que aumenta el aporte térmico, se incrementa de igual manera el ancho del cordón, ver figura 3.21. La misma tendencia se observó para las tres diferentes orientaciones del electrodo, en mayor o menor proporción de acuerdo al ángulo de trabajo utilizado, tal como se muestra en las figuras 3.22, 3.23 y 3.24 para los nueve aportes térmicos que se utilizaron para llevar a cabo las uniones, lo que indica que el aporte térmico y el ancho del cordón están estrechamente relacionados.

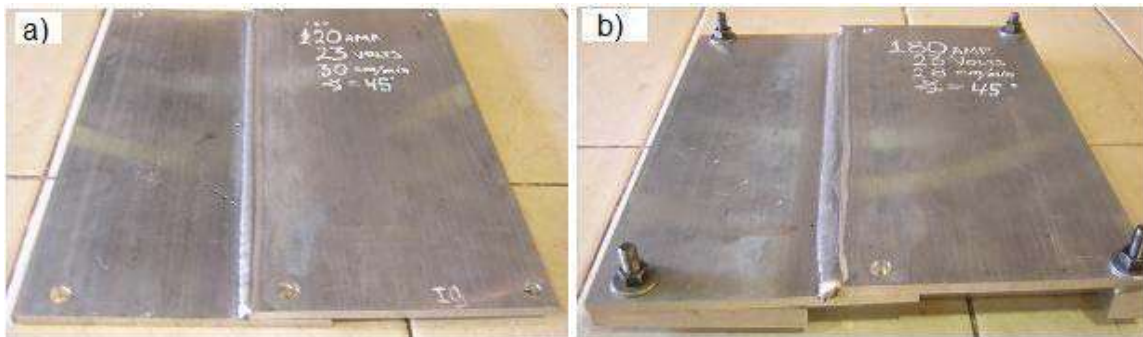


Figura 3.21 Efecto del aporte térmico en el ancho del cordón, a) 441.6 J/mm y b) 736 J/mm

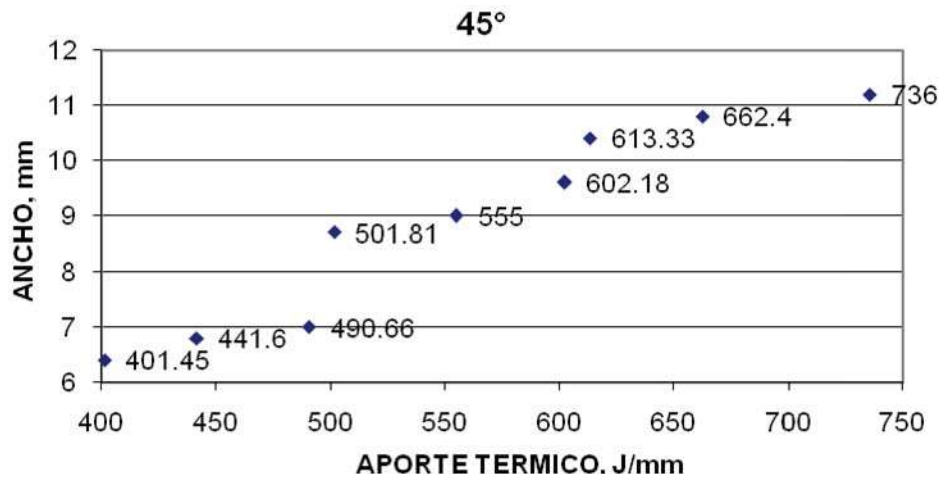


Figura 3.22 Relación entre el aporte térmico y el ancho del cordón para un ángulo de 40°

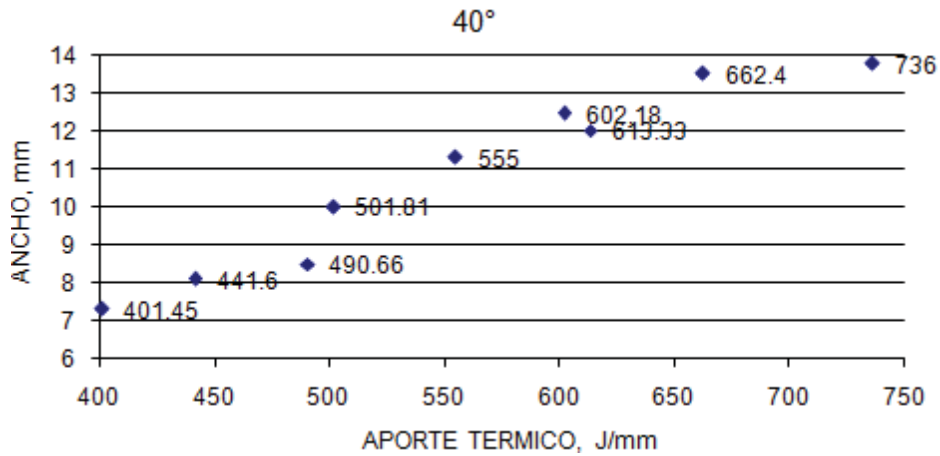


Figura 3.23 Relación entre el aporte térmico y el ancho del cordón para un ángulo de 40°

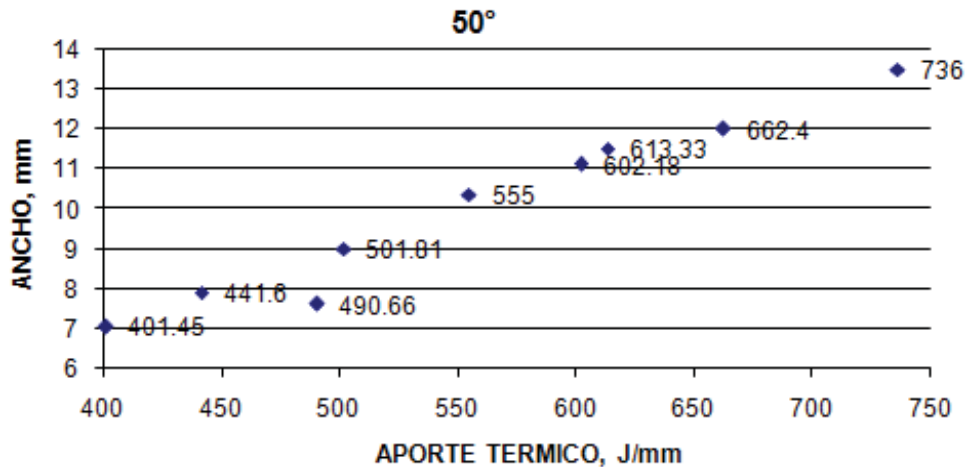


Figura 3.24 Relación entre el aporte térmico y el ancho del cordón para un ángulo de 40°

Como se puede observar, el ancho del cordón de soldadura depende de manera importante de la intensidad de corriente, velocidad de avance y ángulo de trabajo. Ahora bien, optimizando el sistema y después de haber analizado todos los datos experimentales, si lo que se busca es obtener el menor ancho del cordón de soldadura, las condiciones para lograrlo se muestran en la tabla 3.7. Por el contrario, si lo que se desea es el mayor ancho del cordón, esto puede conseguirse apoyándose en los datos de la tabla 3.8.

Tabla 3.7 Condiciones para minimizar el ancho del cordón

Meta: Minimizar ANCHO DEL CORDON Valor óptimo : 5.97mm			
Factor	Bajo	Alto	Optimo
AMPERAJE (A)	120	180	120
VELOCIDAD DE AVANCE(mm/s)	4.5	5.5	5.4
ANGULO (grados)	40	50	45.4

Tabla 3.8 Condiciones para maximizar el ancho del cordón de soldadura

Meta: Maximizar ANCHO DEL CORDON Valor óptimo : 13.6 mm			
Factor	Bajo	Alto	Optimo
AMPERAJE (A)	120	180	180
VELOCIDAD DE AVANCE(mm/s)	4.5	5.5	4.5
ANGULO (grados)	40	50	40

Como se ha comentado en los capítulos anteriores, las propiedades mecánicas de una unión dependen en gran parte de la geometría del cordón de soldadura. (Ref. 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23). Hasta el momento únicamente se han analizado y discutido variables de la geometría del cordón como son la altura o convexidad y el ancho. Variables que por sí solas son muy importantes, tal como se hace mención en la investigación correspondiente a la referencia 23 donde reportan un coeficiente de forma del cordón de soldadura dado por la relación entre el ancho del cordón y la altura del refuerzo y, en el cual se basan para predecir propiedades mecánicas de la unión.

3.3.3.3 Análisis de la penetración de la soldadura

La penetración es la otra variable de respuesta de la geometría del cordón de soldadura que fue analizada. Según la bibliografía consultada, el grado de penetración de una soldadura depende principalmente de la intensidad de corriente y velocidad de avance de la soldadura. (Ref. 1, 24, 29, 32). Sin embargo, en la presente investigación se encontró que el ángulo de trabajo para una soldadura de filete tiene también un efecto muy importante sobre la penetración del cordón. En la figura 3.25 se muestra el comportamiento individual observado de la intensidad de corriente (amperaje), velocidad de avance y orientación de electrodo (ángulo) sobre la penetración de las soldaduras realizadas. Tal como lo menciona la literatura, se observó que aumentando la intensidad de corriente se incrementa la penetración. Por otro lado, se pudo observar que la mayor penetración del cordón se obtuvo con una velocidad de avance intermedia (5 mm/s). Analizando el efecto del ángulo de trabajo, se notó que utilizando una orientación de electrodo de 40° la penetración de la soldadura es prácticamente nula, tal como ya se había mencionado.

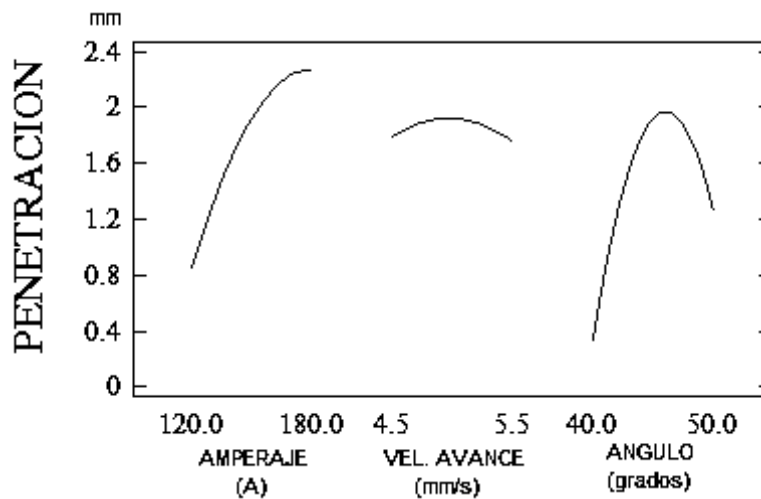


Figura 3.25 Comportamiento individual de las variables operativas sobre la penetración del cordón

Los mejores resultados encontrados con los ángulos de trabajo de 45° y 50° son atribuidos a que con dichos ángulos hay una mejor concentración del arco en el punto central entre las dos placas de trabajo, produciendo un cordón de soldadura más uniforme y con mayor penetración. (Ref. 24, 32). Por lo anterior, queda demostrado que el ángulo de trabajo es una variable operativa muy importante que debe considerarse para lograr un buen cordón de soldadura.

La ecuación de regresión obtenida a partir del diseño experimental que relaciona la intensidad de corriente, velocidad de avance de la soldadura y ángulo de trabajo es la siguiente:

$$\text{PENETRACION} = -105.213 + 0.00435185(A) + 6.53056 (V.A) + 3.855(\acute{\alpha}) - 0.000401235(A)^2 + 0.00444444(A) (V.A) + 0.00261111(A) (\acute{\alpha}) - 0.611111 (V.A)^2 - 0.025 (V.A) (\acute{\alpha}) - 0.0447778 (\acute{\alpha})^2 \text{-----EC.3.3}$$

DONDE:

A = Intensidad de corriente (A)

V.A = Velocidad de avance de la soldadura (mm/s)

$\acute{\alpha}$ = Angulo de trabajo (grados)

Por medio de la relación anterior se puede llegar a obtener una aproximación de la penetración de un cordón de soldadura que se podría conseguir con un determinado valor de intensidad de corriente, velocidad de avance y ángulo de trabajo. En la figura 3.26 se muestran los contornos de superficie de respuesta estimada para la penetración para un ángulo 45° de acuerdo con la ecuación 3.3.

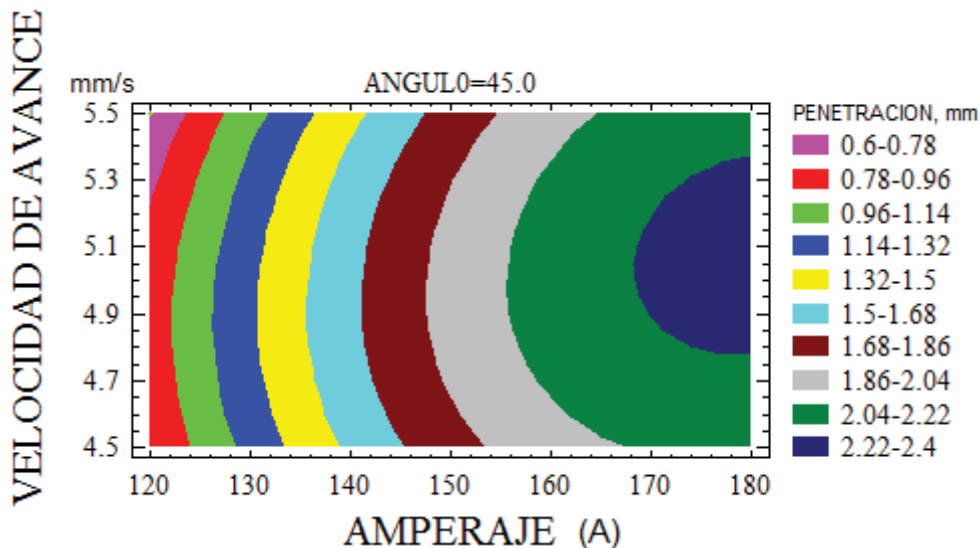


Figura 3.26 Contornos de superficie de respuesta estimada para el ancho de cordón

Como se puede observar en el gráfico anterior, los cordones que presentaron menor penetración fueron los realizados con la menor intensidad de corriente y mayor velocidad de avance de la soldadura, debido a que el arco no tiene el tiempo necesario de proporcionar la justa cantidad de calor. Entonces, se podría pensar que con la mayor intensidad de corriente y menor velocidad de avance de la soldadura se obtendrían los cordones de mayor penetración, lo cual no fue así debido a que cuando se utilizan elevadas intensidades de corriente y bajas velocidades de avance, el arco actúa más sobre la piletta líquida que sobre la pieza de trabajo, produciendo cordones anchos, abultados y con deficiencia en la penetración. (Ref. 1, 24, 32). Por lo tanto, los cordones que

presentaron mayor penetración fueron los realizados con un rango de amperaje de 170 a 180 y una velocidad de avance promedio de 5 mm/s, tal como se puede ver en la figura 3.26.

Por otro lado, optimizando el diseño experimental se lograron obtener los datos de intensidad de corriente (amperaje), velocidad de avance y ángulo del electrodo con los cuales se pudiera alcanzar la mayor penetración de un cordón para una soldadura de filete con condiciones similares a las mostradas en la presente investigación, ver tabla 3.9.

Tabla 3.9 Optimización del diseño experimental para la penetración del cordón

Meta: Maximizar LA PENETRACIONAN DEL CORDON Valor óptimo : 2.4 mm			
Factor	Bajo	Alto	Optimo
AMPERAJE (A)	120	180	180
VELOCIDAD DE AVANCE(mm/s)	4.5	5.5	5
ANGULO (grados)	40	50	46

Como se puede observar, para poder lograr la optimización de las variables de la geometría de un cordón de soldadura se requiere de una gran cantidad de pruebas para, de esta forma, poder comprender el efecto individual y en conjunto que tienen cada una las variables operativas sobre el cordón de soldadura y poder llegar así, a la recomendación de un procedimiento.

3.3.3.4 Análisis microestructural de las uniones soldadas

Durante el proceso de solidificación de una soldadura se producen zonas con diferentes tipos de crecimiento de grano, partiendo de la interfase o línea de fusión hasta el centro del cordón, los cuales son generados por el grado de sobreenfriamiento constitucional en los límites de la piletta de soldadura. En la figura 3.27 se muestra la microestructura en la interface del cordón de una de las uniones soldadas, en la cual se puede observar un crecimiento de grano epitaxial, característico en la mayoría de las soldaduras por fusión. En la solidificación epitaxial el crecimiento de los granos se da a partir de direcciones bien definidas. Para materiales con estructura FCC (cubica centrada en las caras), como las aleaciones de aluminio, la dirección de crecimiento de los granos es $\langle 111 \rangle$, donde cada grano crece sin cambio en su dirección. De

acuerdo con la metalografía de la figura 3.27, a partir de la línea de fusión hacia el cordón de soldadura, primeramente se tiene un crecimiento planar, para posteriormente pasar de planar a columnar y de columnar a dendrítico. Como ya se mencionó, estos cambios en los modos de solidificación se deben a variaciones en el gradiente de temperatura de la interface solido-liquido y en la velocidad de crecimiento. (Ref. 40)

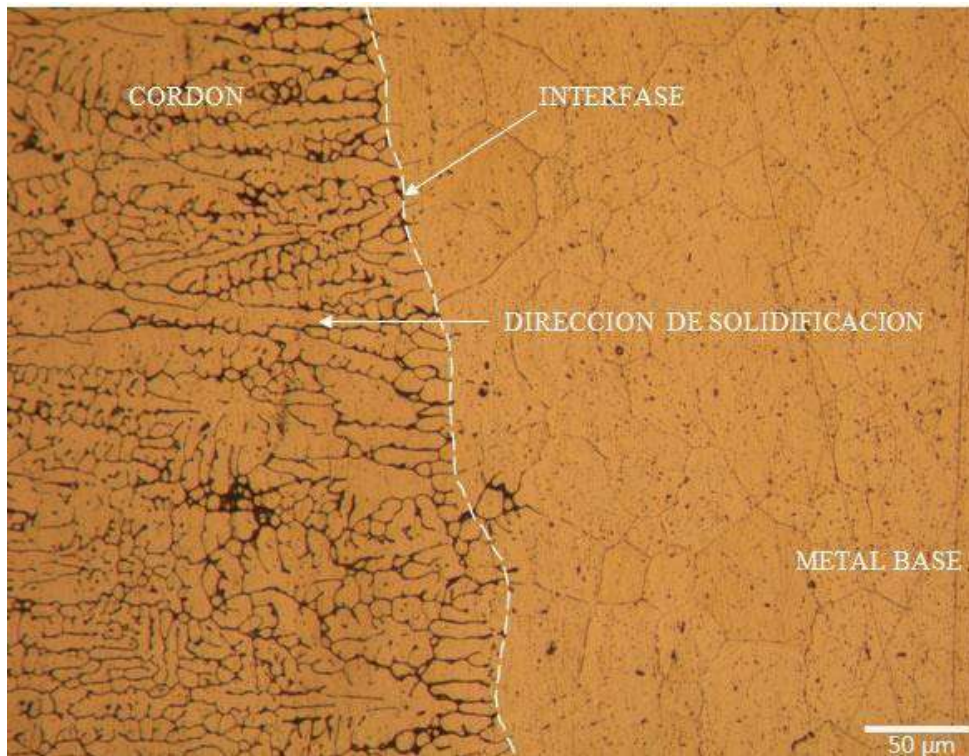


Figura 3.27 Microestructura de unión soldada de la aleación de aluminio 6061-T6

En la figura 3.28 se muestra la micrografía tomada en el centro del cordón de soldadura, en la cual se puede observar una microestructura más fina comparada con la observada al inicio de la línea de fusión o interfase, ver figura 3.27. Esta variación en la microestructura del cordón de soldadura se debe a que la velocidad de enfriamiento es más alta en la línea central del cordón y más baja en la línea de fusión, debido a que la distancia entre el punto de temperatura máxima de la pileta y el borde de la pileta, es más grande en la línea central del cordón que en la línea de fusión, puesto que la forma de la pileta de soldadura es alargada. Por lo tanto, el espaciamiento entre los brazos de las dendritas decrece a partir de la línea de fusión hacia la línea central del cordón. Esta tendencia de refinamiento de la microestructura a partir de la línea de fusión hacia el

centro del Cordón ha sido reportada por varios autores en la soldadura de otras aleaciones de aluminio (Ref. 40).

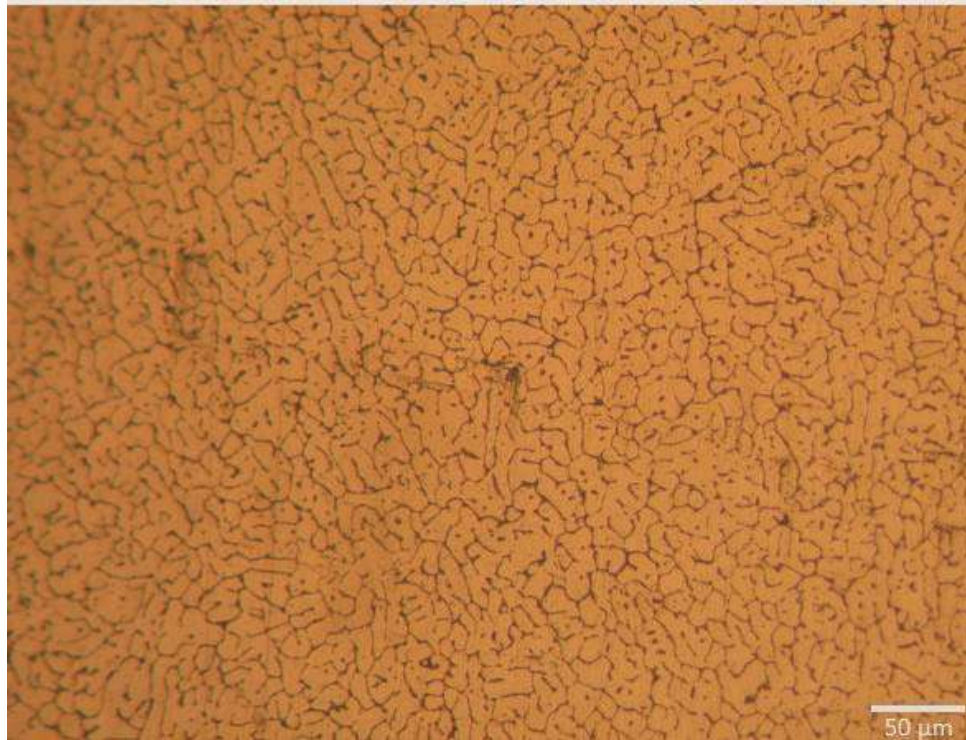


Figura 3.28 Microestructura del centro del cordón

Es importante conocer el desarrollo de la estructura de grano en la zona de fusión, así como el efecto que tienen los diferentes parámetros de soldadura sobre la estructura de grano. En la presente investigación se evaluaron dos diferentes zonas de los cordones de soldadura, tal como se muestra en la figura 3.29, para los diferentes aportes térmicos utilizados, reportando únicamente los resultados de tres valores de aporte térmico (mayor, menor e intermedio), con el objetivo de magnificar las diferencias encontradas.

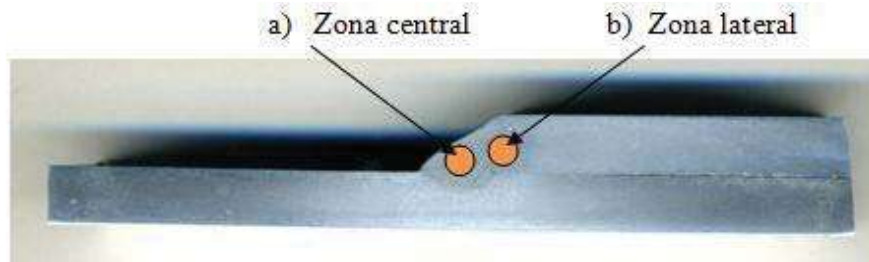


Figura 3.29 Zonas de análisis de la microestructura

En la figura 3.30a se muestra la microestructura del centro del cordón realizado con el mayor aporte térmico, es decir, una intensidad de corriente de 180 amperes y una velocidad de avance

de 4.5 mm/s, en donde se puede observar en su mayoría una estructura fina de granos equiaxiales de diferente tamaño y orientación. En la figura 3.30b se presenta la microestructura de la zona lateral del cordón, en donde se puede apreciar la interfase cordón de soldadura-material base con la dirección preferencial de crecimiento de los granos. A partir de la línea de fusión hacia el cordón de soldadura, se alcanza a observar la forma en la cual fue solidificando el metal de soldadura, con los diferentes modos de crecimiento de grano mencionados anteriormente. Por otro lado, el mayor tamaño de grano observado en la zona afectada térmicamente (ZAT) del material base se debe a la elevada temperatura alcanzada en ésta zona, en la cual el material no fundió pero si alcanzó temperaturas que modificaron su microestructura original y propiedades mecánicas, por lo tanto, el tamaño de la ZAT depende en gran medida del aporte térmico.

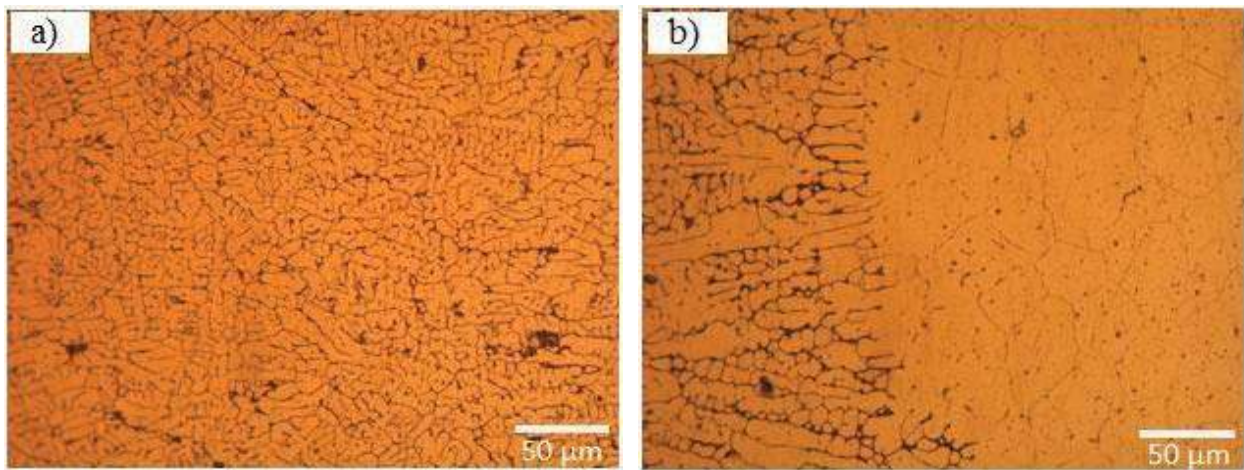


Figura 3.30 Microestructura de la unión realizada con 736 J/mm, a) zona central del cordón y b) zona lateral.

Durante la solidificación los granos tienden a crecer en la dirección perpendicular a la piletta de soldadura debido a que ésta es la dirección del máximo gradiente de temperatura y, por lo tanto, la máxima extracción de calor.

En la figura 3.31a y 3.31b se muestran las metalografías del centro y la zona lateral del cordón, respectivamente, de la unión realizada con un amperaje de 150 A y una velocidad de avance de 5 mm/s, por consiguiente, el calor aportado para dicha soldadura fue de 555 J/mm. En el centro del cordón de soldadura se sigue observando una estructura de granos equiaxiales de diferentes tamaños y orientaciones, aunque mostrando un ligero refinamiento de grano en comparación con

los resultados de la figura 3.30a, lo cual se atribuye al menor aporte térmico utilizado en este cordón, dicho efecto del aporte térmico sobre la microestructura del cordón es reportado en los trabajos correspondientes a las referencias 15 y 16. Por su parte, en la micrografía de la figura 3.31b se muestra la interfase del mismo cordón de soldadura y en la cual se alcanzan a percibir granos columnares y dendríticos más finos con un menor espaciamiento entre los brazos de las dendritas, en comparación con la microestructura mostrada en la figura 3.28b, donde el aporte térmico fue mayor (736 J/mm). Cuando se utilizan velocidades de avance lentas, lenta es también la velocidad de enfriamiento, lo que resulta en granos más gruesos y con un mayor espaciamiento entre las dendritas. Por otro lado, el crecimiento de grano y espaciamiento entre las dendritas o celdas decrecen con el incremento de la velocidad de enfriamiento.

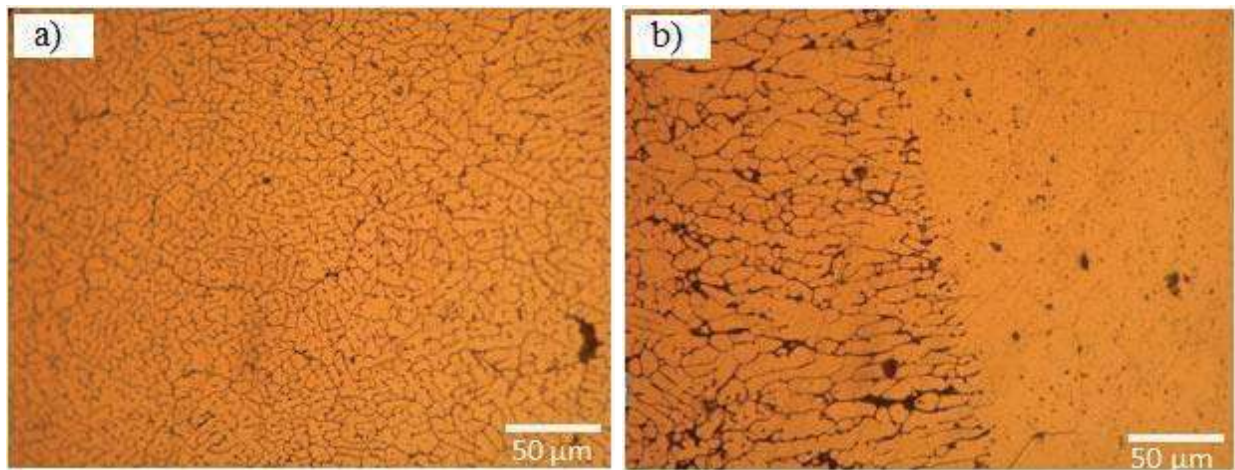


Figura 3.31 Microestructura de la unión realizada con un aporte térmico de 555 J/mm, a) zona central del cordón y b) zona lateral.

En la figura 3.32 se muestran las microestructuras del cordón realizado con el menor aporte térmico (120 A y 5.5 mm/s). Al realizar una comparación con los resultados obtenidos con el mayor aporte térmico (736 J/mm), en el centro del cordón de soldadura (figura 3.32a), se puede observar el mayor refinamiento de la microestructura, producto de la mayor velocidad de enfriamiento presentada en ésta unión. Como ya se dijo, cuando mayor sea el aporte térmico mayor será el crecimiento de grano en el metal de soldadura. En la zona lateral del cordón (figura 3.32b), el menor crecimiento y espaciamiento entre los granos columnares y dendríticos fue observado. Haciendo una comparación con las microestructuras del cordón realizado con 555 J/mm, el cambio observado fue el mismo, aunque en menor proporción.

En general, ésta tendencia en la microestructura del cordón fue observada para los nueve aportes térmicos utilizados para llevar a cabo las uniones, obviamente en mayor o menor proporción de acuerdo a la magnitud de cada aporte térmico, tal como se acaba de mostrar.

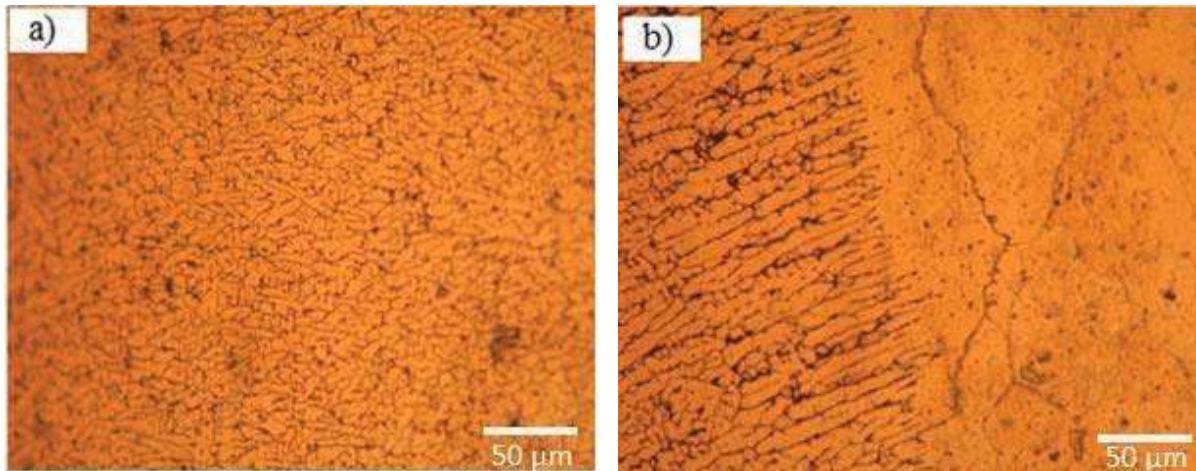


Figura 3.32 Microestructura de la unión realizada con un aporte térmico de 401.4 J/mm, a) zona central del cordón y b) zona lateral.

Como puede verse, la intensidad de corriente y velocidad de avance de la soldadura tienen un efecto significativo no solo en las variables de la geometría del cordón como son el ancho, altura y penetración, sino también en los modos de solidificación y microestructura final. Dicho efecto de los parámetros operacionales es mencionado en la bibliografía correspondiente a la referencia 40, donde reportan los cambios ocurridos en la microestructura del cordón de soldadura utilizando varias velocidades de avance e intensidades de corriente. Por ejemplo, reportan que para una velocidad de avance de 1.69 mm/s, la microestructura cambia de celular fina a celular dendrítica gruesa cuando la intensidad de corriente se incrementa de 150A a 450A.

Por otro lado, durante el análisis microestructural de las uniones no se observó presencia importante de porosidades en el metal de soldadura, lo cual fue uno de los defectos encontrados en la pieza automotriz de aluminio y lo cual se atribuye, entre otras cosas, a la preparación inadecuada que realizaron de las partes a unir antes de la soldadura.

3.3.3.5 Análisis de microdureza de las uniones soldadas

Como se mencionó en el primer capítulo, los materiales endurecidos por precipitación tienden a disminuir sus propiedades mecánicas después de la soldadura debido a los ciclos no controlados de calentamiento y enfriamiento que experimenta la ZAT. Hay una asociación directa entre el aporte térmico total y la dureza del material base adyacente al cordón (zona afectada térmicamente) después de la soldadura. Cuando mayor sea el aporte térmico mayor será la pérdida de resistencia. (33, 34, 40)

Para evaluar el efecto del aporte térmico sobre la microdureza de las uniones soldadas de aluminio, se seleccionaron tres diferentes aportes térmicos (736, 555 Y 401.4 J/mm) y se compararon los resultados obtenidos. Prediciendo que la microdureza podía ser diferente en las diferentes zonas del filete, las mediciones se realizaron de manera individual sobre cada placa, partiendo del centro del cordón de soldadura hacia los extremos, tal como se muestra en 3.33.

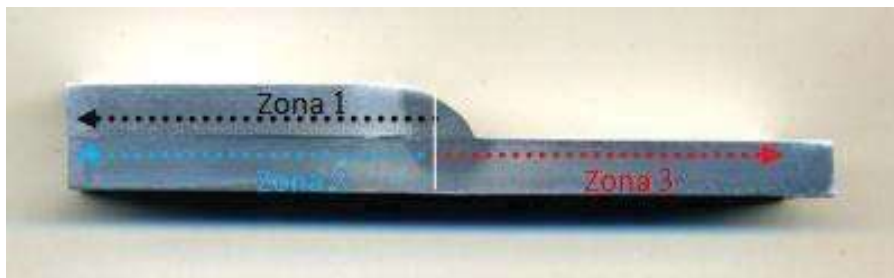


Figura 3.33 Zonas de mediciones de la microdureza

En la figura 3.34 se muestran los perfiles de microdureza obtenidos en las soldaduras realizadas con el mayor aporte térmico (intensidad de corriente de 180 A y una velocidad de avance de 4.5 mm/s). En general, en el cordón de soldadura se observó un valor promedio de microdureza de 85 Vickers con un ligero incremento desde el centro hacia los extremos, atribuido a la microestructura más fina presente en el centro del cordón. Por otro lado, se puede apreciar como los valores de microdureza en algunos puntos de la zona afectada por el calor cayeron hasta un 30 % de la microdureza del material base, debido al sobre-envejecimiento ocasionado por el proceso de soldadura. (Ref. 7, 33, 34, 40). Comparando las zonas de la unión analizadas, podemos

observar en la zona 3 una ZAT mas angosta y con menos caídas de microdureza, se cree que la placa de aluminio colocada en la parte inferior de ese lado de las juntas, tuvo alguna influencia en la velocidad de enfriamiento. Analizando el material base no afectado por el calor (MB), podemos observar una recuperación notable de microdureza.

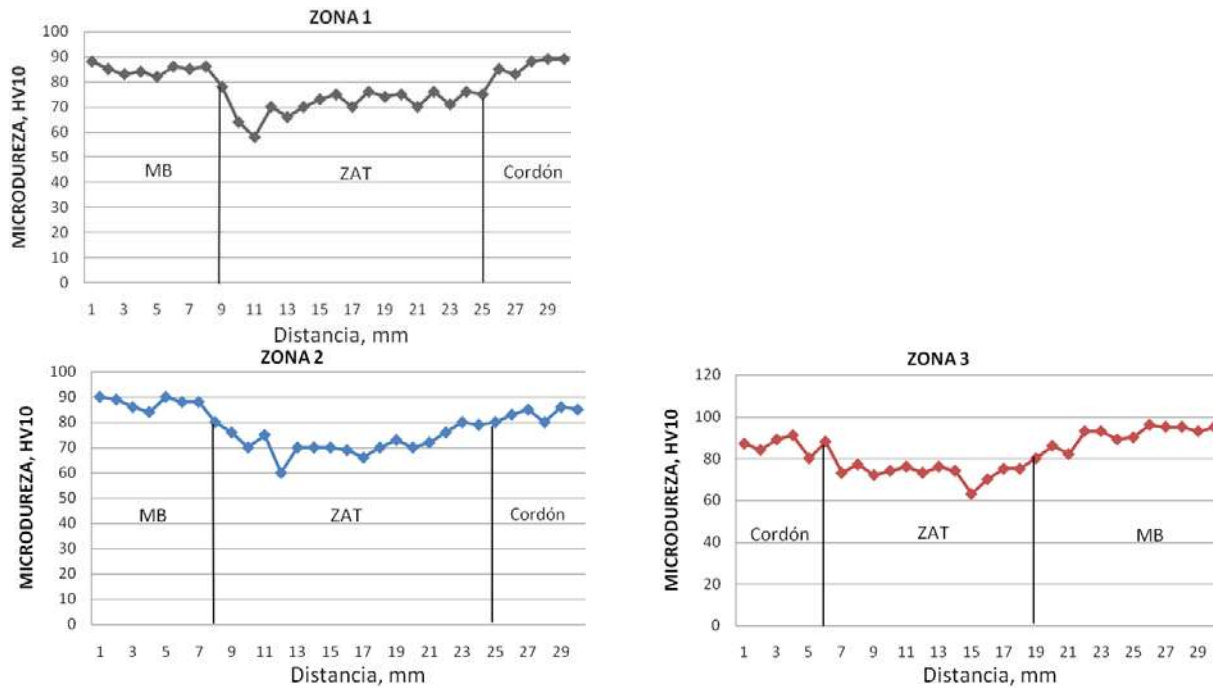


Figura 3.34 Perfiles de microdureza obtenidos para un aporte de 736 J/mm

En la figura 3.35 se presentan los perfiles de microdureza que representan a las uniones realizadas con una intensidad de corriente de 150A y una velocidad de avance de 5 mm/s, es decir, un calor aportado de 555 J/mm. Comparando los valores de microdureza en las diferentes zonas con respecto a los perfiles obtenidos con el aporte térmico de 736 J/mm, no se aprecia un cambio muy importante. En la zona afectada térmicamente se siguen observando los valores más bajos de microdureza aunque con una leve recuperación en la zona de dureza mínima. En el cordón de soldadura los valores se incrementaron ligeramente, apreciándose la misma tendencia de valores más altos al centro del mismo. También se puede ver que el tamaño de la ZAT es muy similar para los dos aportes, ligeramente menor para el aporte de 555 J/mm. Por otro lado, en el metal base se puede observar que hay un incremento de microdureza a lo largo del mismo,

teniendo un comportamiento uniforme al final de la muestra. En general las zonas 1, 2 y 3 muestran un valor promedio de microdureza en el material base de 90 Hv₁₀.

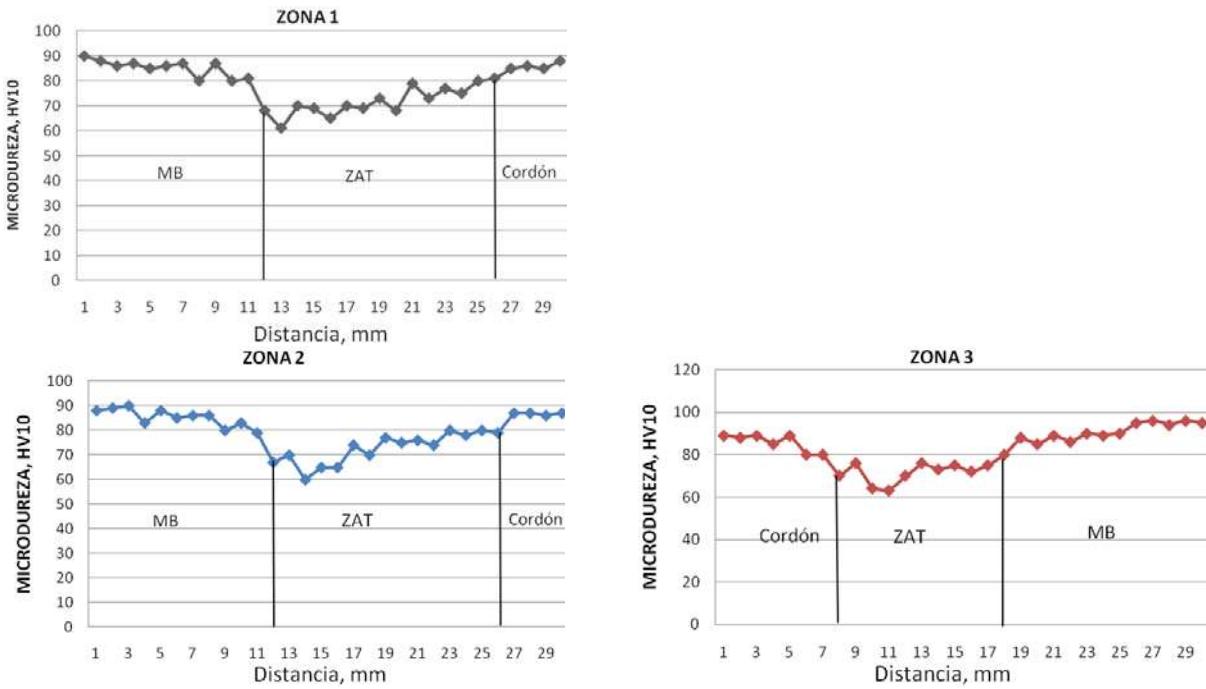


Figura 3.35 Perfiles de microdureza obtenidos para un aporte de 555 J/mm

Continuando con el análisis del comportamiento de la microdureza, en las graficas de la figura 3.36 se muestra el perfil obtenido de la soldadura realizada con el menor aporte térmico (401.45 J/mm), en donde se puede observar una significativa menor pérdida de dureza en la ZAT comparada con los resultados observados en la figura 3.34 y 3.35. De acuerdo con la figura 3.36 los menores valores de microdureza registrados en la ZAT para las tres diferentes zonas analizadas estuvieron por encima de los 70 Hv₁₀, mientras que con el mayor aporte térmico utilizado se observaron valores por debajo de los 60 Hv₁₀.

Por otro lado, el menor calor aportado por unidad de longitud de la soldadura producto de la mayor velocidad de avance y menor intensidad de corriente, también resultó en un considerable menor ancho de la zona afectada térmicamente, ver figura 3.36, lo cual es muy importante. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, las uniones realizadas con el menor aporte térmico fueron las que peor geometría del cordón presentaron.

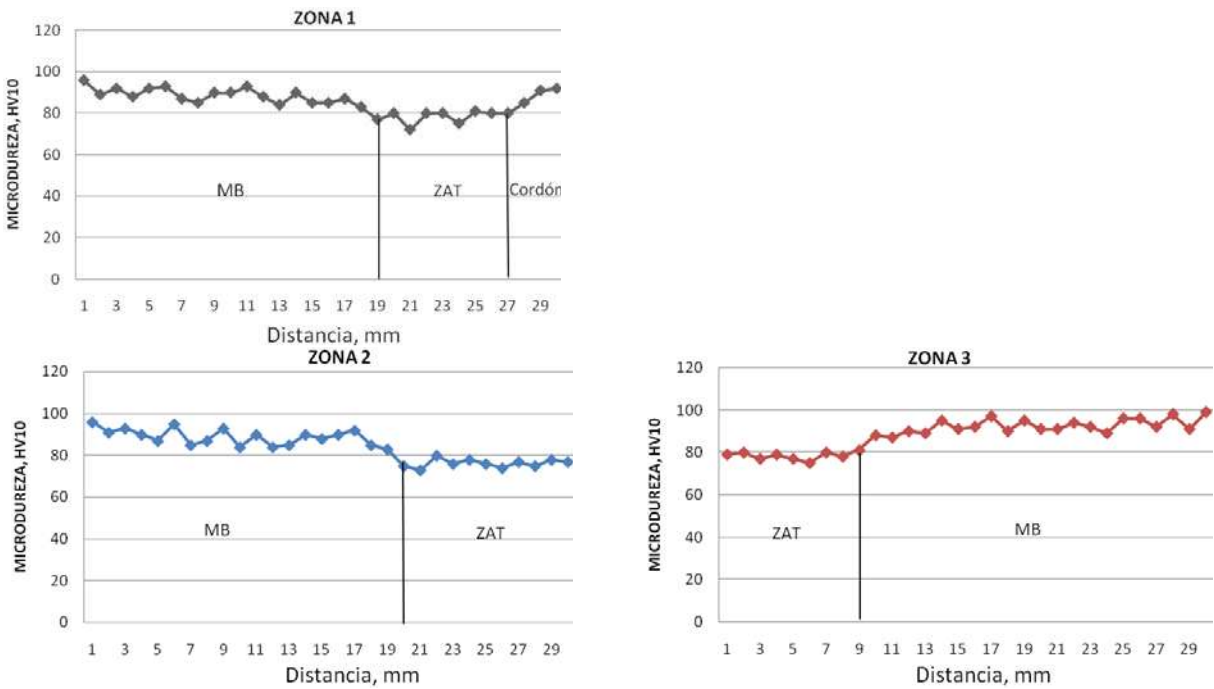


Figura 3.36 Perfiles de microdureza obtenidos para un aporte de 401.45 J/mm

Como puede verse, el aporte térmico debe ser limitado cuando se sueldan aleaciones de aluminio tratables térmicamente, puesto que el daño metalúrgico ocasionado al material base depende en demasía del calor aportado durante la ejecución del proceso.

3.3.3.6 Propiedades mecánicas del material base y uniones soldadas

Como se mencionó en el capítulo anterior, con la finalidad de corroborar sus propiedades mecánicas, al material base se le practicaron dos ensayos de tensión. En la tabla 3.10 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.10 Propiedades mecánicas obtenidas del material base

Ensayo #	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)	Elongación (%)
1.	274	302	10.5
2.	274	304	10.6

Según especificaciones internacionales (Ref. 30, 41), las propiedades mecánicas nominales de una aleación de aluminio 6061-T6 son: Esfuerzo de fluencia 276 MPa, Esfuerzo máximo 310 MPa y elongación o alargamiento 12%. Por lo tanto, podemos decir que los valores obtenidos para el material base se encuentran dentro de lo establecido por dichos códigos.

Como también se mencionó, para evaluar la resistencia de las soldaduras de filete realizadas y ver el efecto de los parámetros operacionales, fueron ensayadas un total de 9 probetas. En la tabla 3.11 se muestran las probetas seleccionadas para su análisis y los resultados obtenidos.

Tabla 3.11 Resultados de las soldaduras ensayadas

Probeta #	Amperaje (A)	Vel. de Avance (mm/s)	Angulo de trabajo (grados)	Aporte térmico (J/mm)	Esfuerzo de corte (Mpa)
1	120	5.5	40°	401.45	60.6
2	150	5	40°	555	65.4
3	180	4.5	40°	736	67.7
4	120	5.5	45°	401.45	72.4
5	150	5	45°	555	88.8
6	180	4.5	45°	736	79.7
7	120	5.5	50°	401.45	65.9
8	150	5	50°	555	82.9
9	180	4.5	50°	736	78.8

Como puede verse, las uniones soldadas con un ángulo de trabajo de 40° fueron las que resultaron con valores de esfuerzo de corte más bajos, lo cual era de esperarse, puesto que durante en análisis de las variables de la geometría del cordón, fueron estas soldaduras las que presentaron los cordones más anchos, más convexos y con menos penetración. Por otro lado, estas soldaduras mostraron un ligero incremento en su resistencia en la medida que se fue incrementando la intensidad de corriente y se fue disminuyendo la velocidad de avance, aunque en general, mostraron propiedades muy bajas. En la figura 3.37 se muestran las probetas fracturadas de las soldaduras realizadas con dicho ángulo de trabajo y aportes térmicos de 401.4 J/mm, 555 J/mm y 736 J/mm.

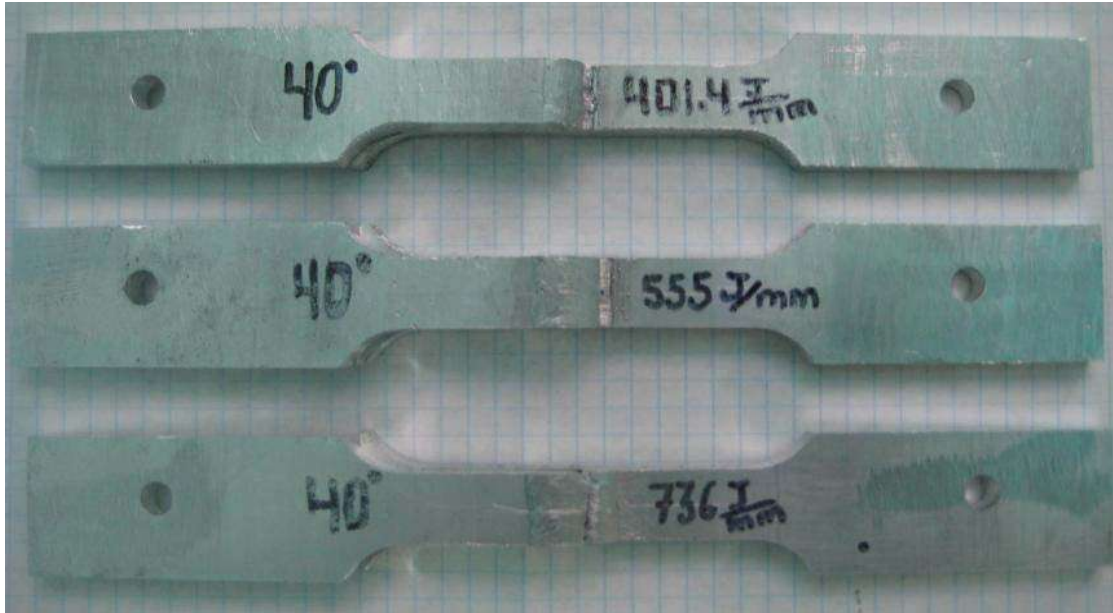


Figura 3.37 Probetas fracturadas de soldaduras realizadas con un ángulo de 40°

De acuerdo con la tabla de resultados 3.11, los valores de resistencia más altos fueron los observados en las soldaduras realizadas con un ángulo de trabajo de 45°. Como se comentó anteriormente, las soldaduras realizadas con una inclinación del maneral o antorcha de soldadura de 45° con respecto a la superficie del metal base, fueron las que arrojaron una mejor forma geométrica del cordón de soldadura, por tal motivo, su comportamiento mecánico fue mejor. En la figura 3.38 se presentan las probetas fracturadas correspondientes a estas uniones con los tres diferentes aportes térmicos ya descritos, de las cuales el mejor resultado de resistencia lo presentó la soldadura realizada con una intensidad de corriente de 150 A y una velocidad de avance de 4.5 mm/s, es decir, la unión realizada con un aporte térmico de 555 J/mm. En principio se esperaba que los mejores resultados se observaran en la unión realizada con el mayor aporte térmico, lo cual no fue así, debido a que cuando se utilizan altas intensidades de corriente y bajas velocidades de avance, el cordón de soldadura se vuelve más ancho y convexo, con una consiguiente menor penetración, tal como lo apuntan los autores de las referencias: 1, 24 y 32.

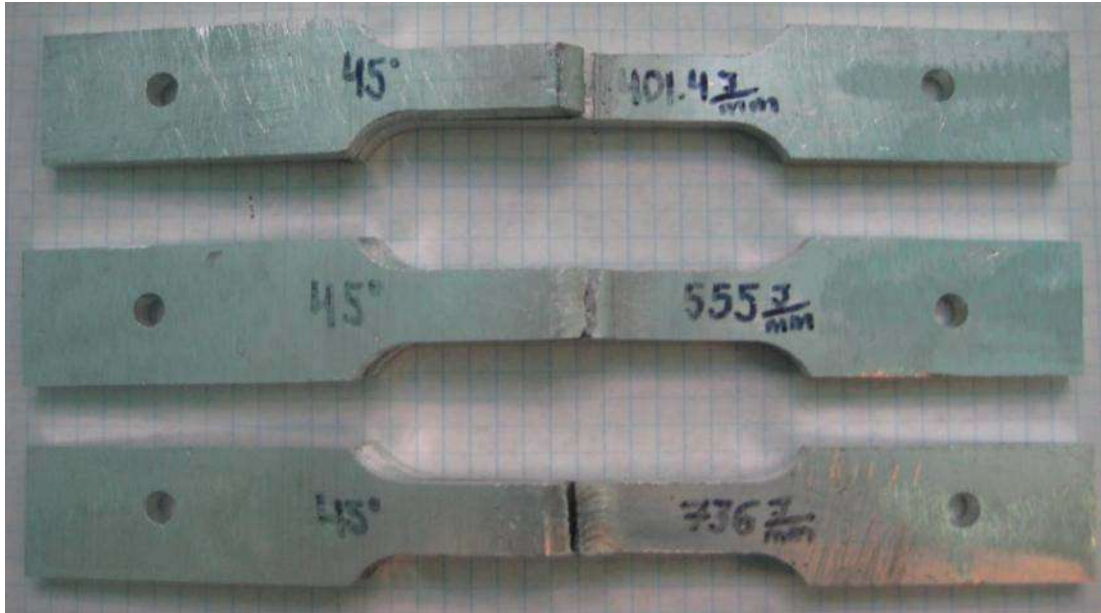


Figura 3.38 Probetas fracturadas de soldaduras realizadas con un ángulo de 45°

En lo que concierne a las soldaduras realizadas con un ángulo de trabajo de 50°, estas también mostraron mejores propiedades mecánicas que las realizadas con ángulo de 40°. En la figura 3.39 se muestran las probetas fracturadas de las uniones pertenecientes a dicho ángulo, para las cuales, se reportaron valores de resistencia de 65.9, 82.9 y 78.8 MPa, para aportes térmicos de 401.4, 555 y 736 J/mm, respectivamente. Al igual que en la soldadura realizada con ángulo de trabajo de 45°, el mejor resultado se obtuvo con un aporte térmico de 555 J/mm. En general, en las todas probetas ensayadas la menor resistencia se observó en las soldaduras realizadas con el menor amperaje (120A) y la mayor velocidad de avance (4.5 mm/s), debido a un tamaño insuficiente del filete del cordón producto de un aporte térmico muy bajo. (Ref. 24, 32).



Figura 3.39 Probetas fracturadas de soldaduras realizadas con un ángulo de 45°

Como puede verse, el tamaño y forma del cordón de soldadura y por consiguiente las propiedades mecánicas de la unión, dependen de manera importante del ángulo de trabajo, intensidad de corriente y velocidad de avance, por lo tanto, es muy importante la selección correcta de estos parámetros.

3.3.3.7 Análisis de las fracturas mediante MEB

Como se comentó anteriormente, la superficie fracturada de las probetas ensayadas fue analizada por microscopía electrónica de barrido para revelar su morfología y describir el tipo de fractura presente, así como la presencia de posibles compuestos intermetálicos.

En la figura 3.40 se muestra una fractografía del material base, en la cual se puede observar una superficie de fractura continua y fibrosa, formada a partir del crecimiento y coalescencia de microhuecos o microvacíos debido a la sobrecarga aplicada al material. Estas características son indicativas de un tipo de fractura dúctil, típica de las aleaciones de aluminio, en la cual se experimenta una sustancial deformación plástica antes de la fractura. Por otro lado, la forma de los hoyuelos en la superficie de fractura originados a partir de dicha coalescencia de los microvacíos, está gobernada por la dirección del esfuerzo máximo aplicado al material. Una fractura bajo carga de tensión uniaxial resulta esencialmente en la formación de hoyuelos cónicos

equiaxiales que apuntan en la dirección de la extensión de la fractura, (Ref. 31), tal como se puede ver en otra fractografía del material base (figura 3.41).

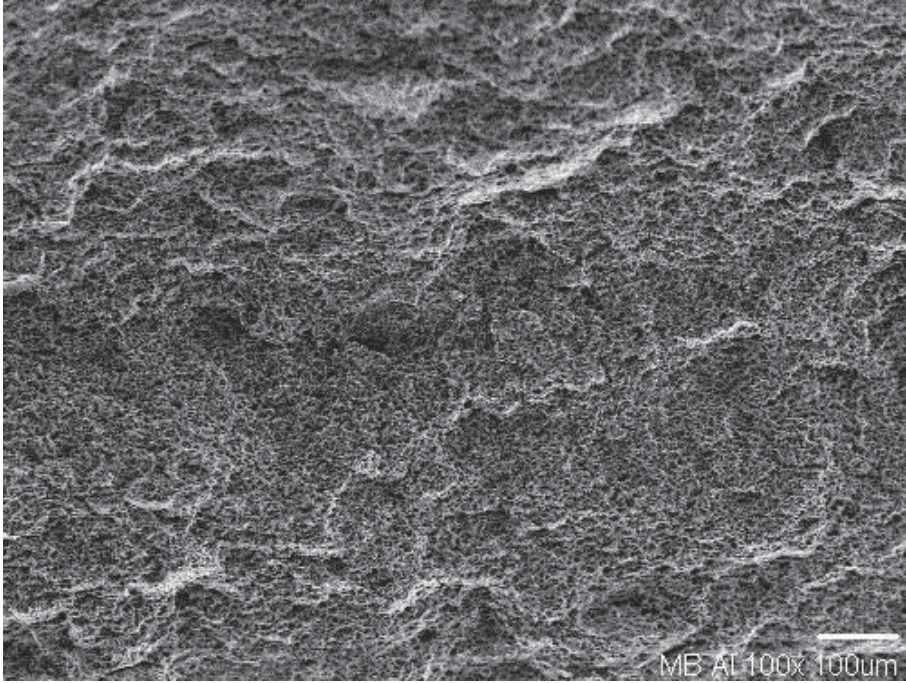


Figura 3.40 Fractura del material base (100x)

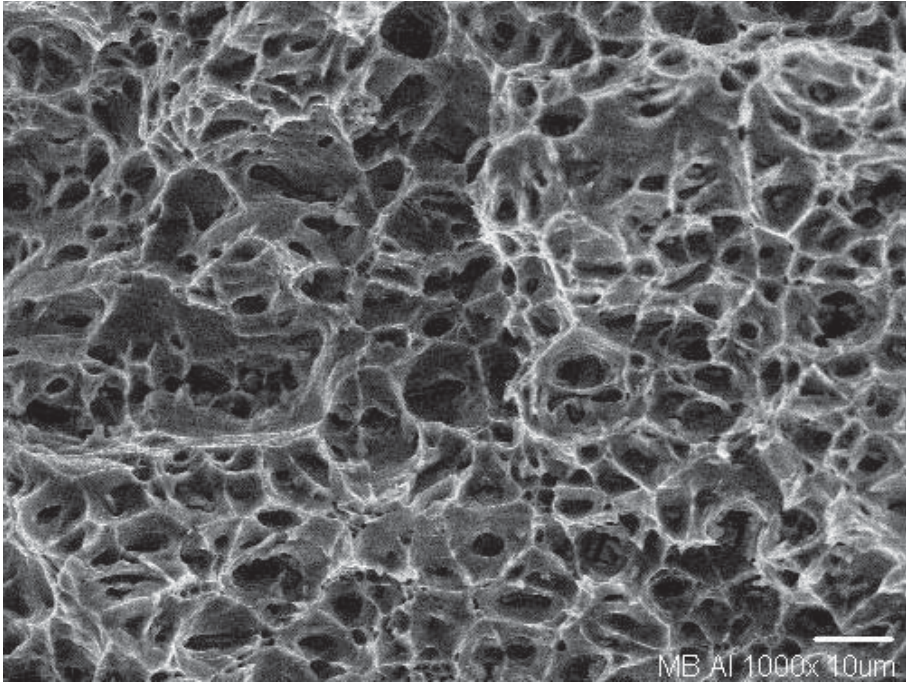


Figura 3.41 Fractura del material base (1000x)

Por otro lado, al fondo de las cavidades de la superficie de fractura se observó un número considerable de intermetálicos de forma cilíndrica, los cuales han sido reportados con una longitud aproximada de 4 a 5 μm y un diámetro de 1 a 1.5 μm (Ref. 3), y a los cuales se le realizó un microanálisis que dio como resultado la presencia de la matriz de aluminio, Magnesio y pequeñas cantidades de Silicio y Carbono, ver figura 3.42.

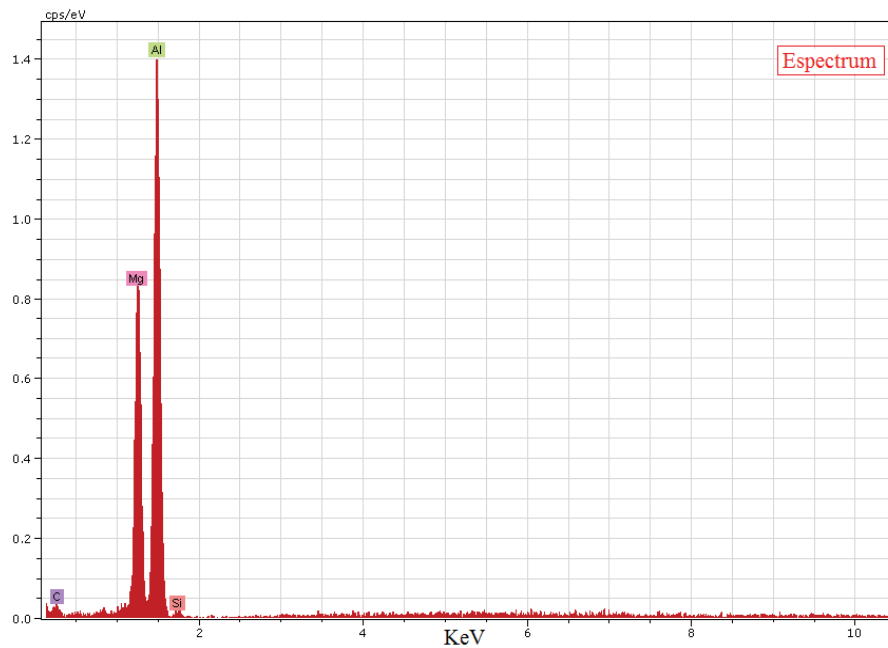
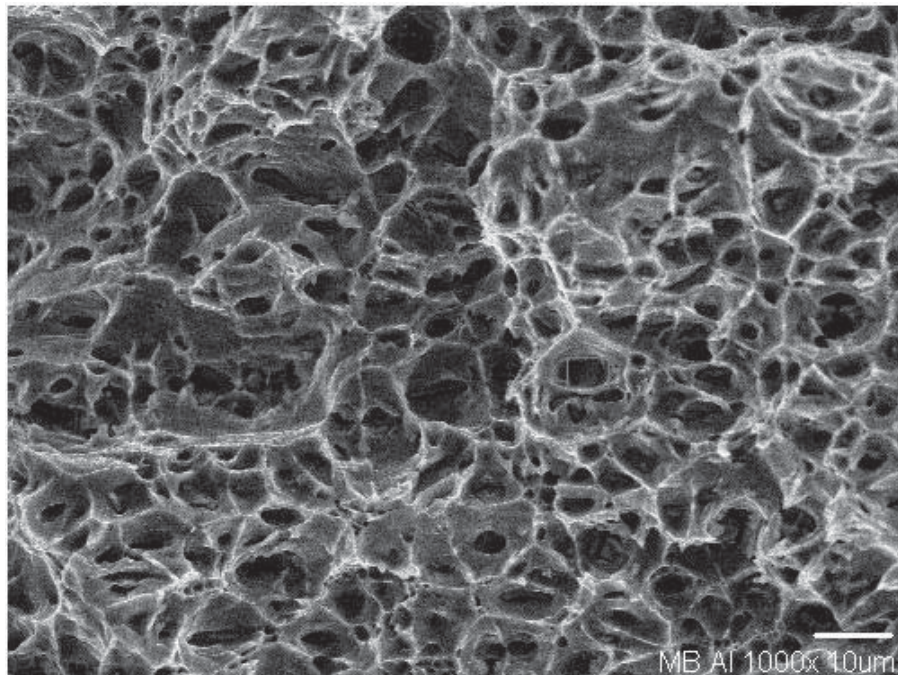


Figura 3.42 Análisis de la fractura del MB

Respecto al análisis de la superficie de fractura de las uniones soldadas, están también presentaron fractura tipo dúctil, pero a diferencia del metal base, exhibieron hoyuelos o cavidades que apuntaban en dirección opuesta de la extensión de la fractura, lo cual es una característica de una fractura por corte.

Como se recordara, en todos los especímenes ensayados la ruptura ocurrió justamente en el metal de soldadura, por tal motivo, se procedió a realizar un análisis de las fracturas que presentaron diferencias más significativas. En la figura 4.43a se muestra la zona de fractura de la soldadura realizada con una intensidad de corriente de 120 A y una velocidad de avance de 4.5 mm/s. en la cual se puede observar una superficie de fractura con hoyuelos de tamaño relativamente uniforme formados a partir del crecimiento y coalescencia de microvacíos debidos al esfuerzo aplicado al espécimen. Por su parte, en la figura 4.43b se presenta la superficie de fractura de la unión realizada con un amperaje de 180 y una velocidad de avance de 4.5 mm/s, en donde se puede observar una diferencia significativa en el tamaño y cantidad de las cavidades.

De acuerdo a las referencias 15 y 31, la cantidad y el tamaño de los huecos o cavidades en la superficie de fractura, dependen de la microestructura original de la soldadura, es por eso de los cambios observados en la fractura de la unión realizada con el mayor aporte térmico con respecto a la de menor aporte. También se menciona, que el tamaño y distribución de los huecos está directamente relacionado con la resistencia del material, es decir, si el tamaño de hoyuelo es fino, se deduce que la resistencia fue más alta.

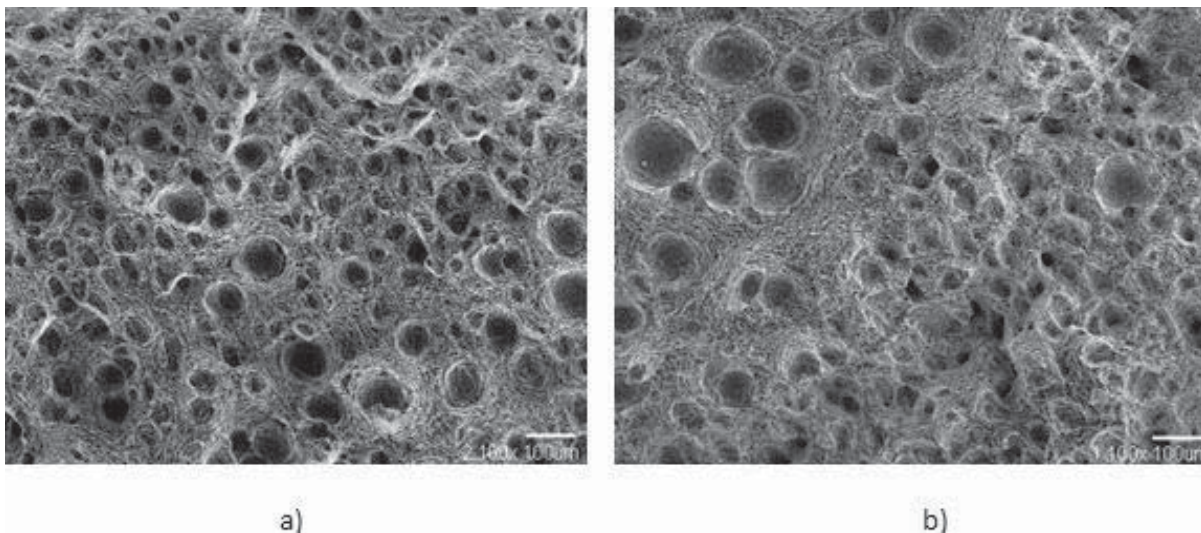


Figura 3.43 Fractura de la soldadura, a) 401.4 J/mm, b) 736 J/mm

Por último, se realizó un microanálisis a los posibles precipitados o intermetálicos encontrados en la superficie de fractura de las uniones soldadas. En la figura 3.44 se muestra la zona de microanálisis y su espectro correspondiente, donde el pico más pronunciado corresponde a la matriz de Aluminio, seguido por el Silicio y Magnesio, y pequeñas cantidades de Hierro y Carbono. En general, la gran mayoría de las fracturas microanalizadas presentaron resultados similares a estos.

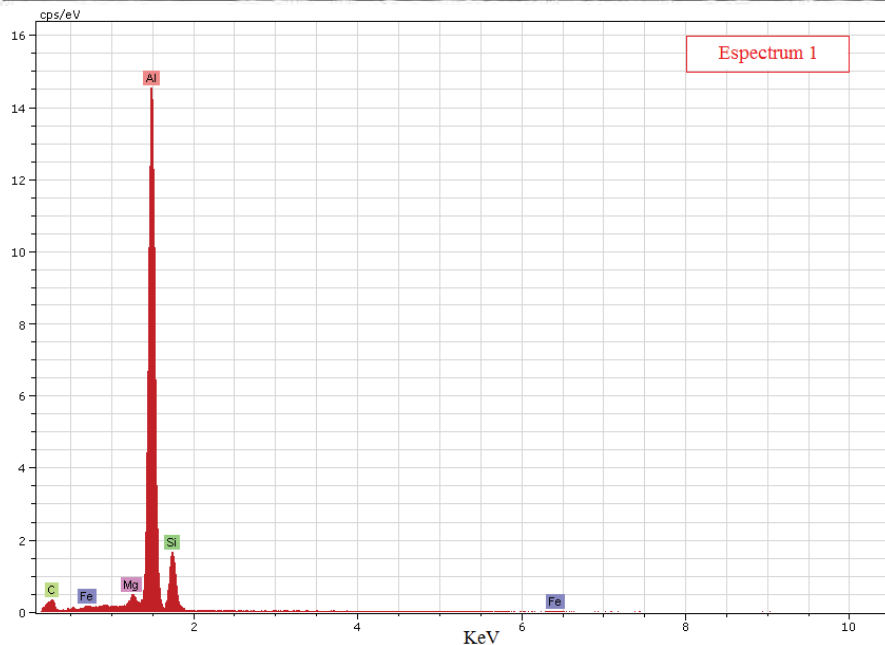
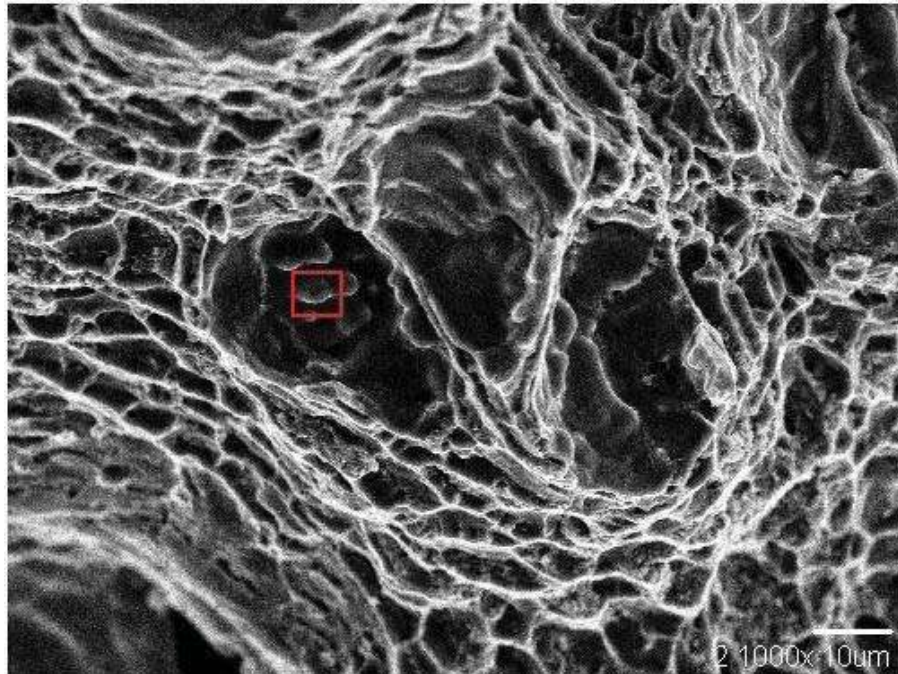


Figura 3.44 Análisis de la superficie de fractura de las soldaduras

En la figura 3.45 se muestra el espectro resultante de otra zona de fractura microanalizada, dando como resultado la presencia de la matriz de Aluminio, alta cantidad de Silicio y Oxígeno, y Magnesio en poca cantidad, así como pequeñas cantidades de otros elementos considerados como impurezas presentes en la aleación. La alta presencia de oxígeno se atribuye a óxidos presentes en el material base o en el material de aporte, los cuales al disociarse por el arco eléctrico suministraron el oxígeno observado en el metal de soldadura. (Ref. 15, 16).

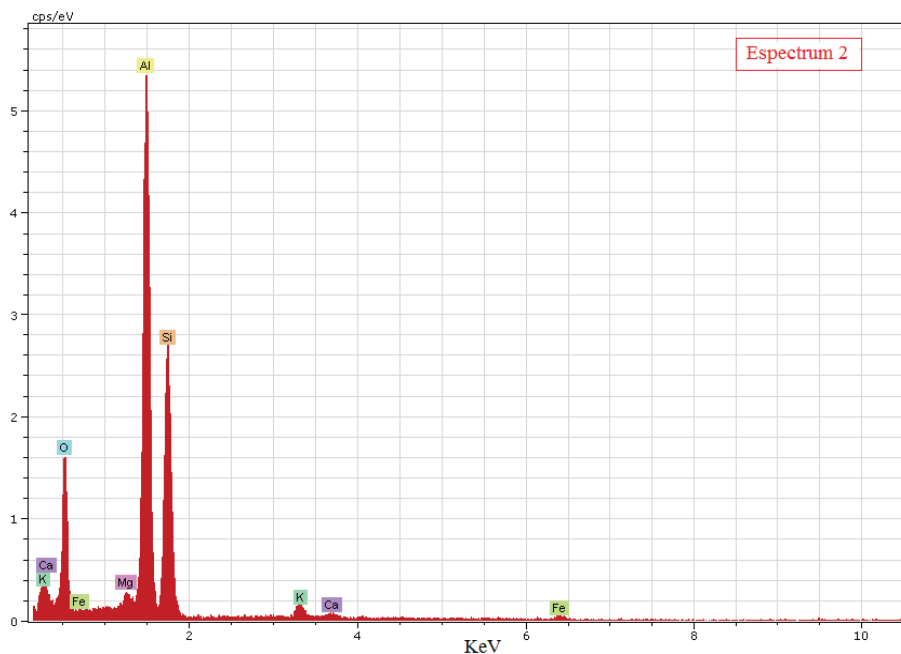
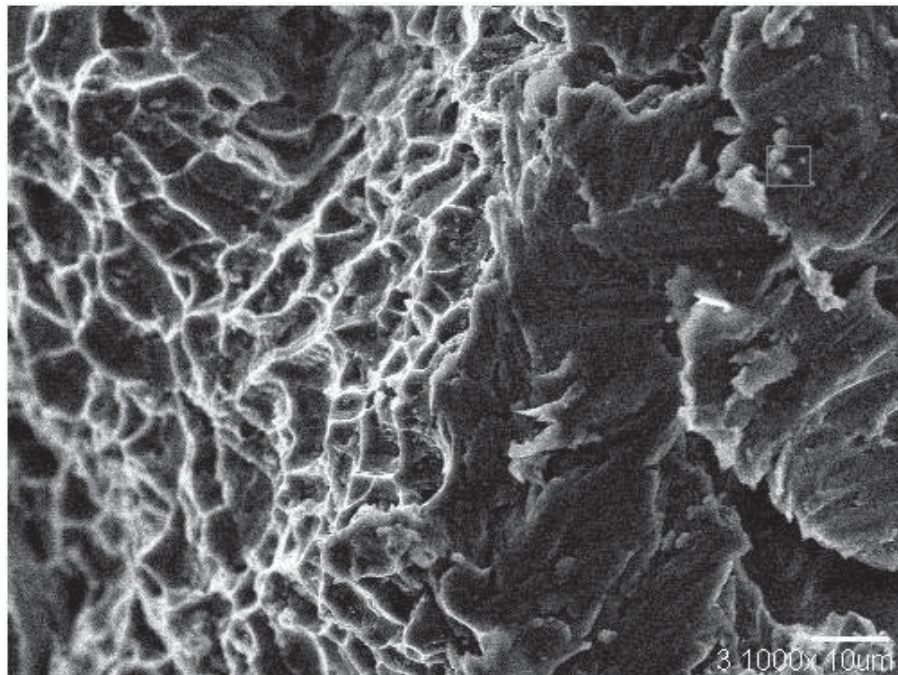


Figura 3.45 Microanálisis de la superficie de fractura de las soldaduras

Como puede verse, con la observación de las fracturas mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido es posible deducir el comportamiento del material base y uniones soldadas.

Por otro lado, mediante el uso de esta herramienta se pudo corroborar el efecto del aporte térmico en la microestructura y propiedades mecánicas de las uniones soldadas.

CAPITULO IV CONCLUSIONES

1. El trabajo experimental del presente proyecto de investigación, permitió evaluar el efecto individual que tienen los parámetros operativos de intensidad de corriente, ángulo de trabajo y velocidad de avance de la soldadura sobre la morfología del cordón y deducir de esta forma, la variable más crítica del proceso.
2. Se demuestra la importancia del ángulo de trabajo en una soldadura de filete, en la cual los resultados obtenidos confirman que este parámetro de soldadura tiene una mayor influencia en la calidad final de la unión que la misma intensidad de corriente y velocidad de avance o desplazamiento de la soldadura.
3. La dependencia de la penetración del cordón del aporte térmico utilizado, sin tomar en cuenta el ángulo de trabajo, tuvo un comportamiento ascendente hasta aportes del orden de los 662. 2 J/mm, a partir de este valor la penetración fue disminuyendo con la consiguiente mayor convexidad y ancho del cordón, debido al incremento en la cantidad del material depositado.
4. Haciendo caso omiso del efecto del ángulo de trabajo sobre la forma del cordón de soldadura, pudo comprobarse que el ancho y la altura o convexidad del cordón son directamente proporcionales a la intensidad de corriente y velocidad de avance. Cordones anchos y convexos resultan de elevados amperajes y demasiadas bajas velocidades de avance. Por lo tanto, la calidad del cordón dependerá de la óptima relación de estos parámetros.
5. El análisis de la geometría del cordón y su resistencia mecánica demostraron que el ángulo de trabajo ideal para una soldadura de filete en juntas a traslape es de 45°. Por el contrario, el uso de un ángulo de 40° producirá los cordones más anchos, más convexos y con menor penetración.

6. En base al estudio metalográfico realizado a las uniones soldadas, se pudo corroborar que la magnitud de la intensidad de corriente y velocidad de avance de la soldadura tienen un efecto significativo en la microestructura final del cordón.
7. Por otro lado, quedó confirmado que cuando mayor es el aporte térmico utilizado en la soldadura de una aleación de aluminio tratable térmicamente, mayor es el decaimiento de las propiedades de microdureza en la zona afectada por el calor, por lo tanto, el calor aportado debe ser limitado en la unión de este tipo de materiales.
8. El uso de la técnica de diseño de experimentos factorial permitió obtener la relación existente entre cada parámetro de soldadura y cada variable del cordón y, con lo cual se podría asegurar o predecir una determinada forma geométrica del cordón y, por consiguiente resistencia mecánica, para determinados valores de dichos parámetros de soldadura.
9. Mediante el análisis por MEB se corroboró que las fracturas del material base y uniones soldadas son de tipo dúctil, característico en las aleaciones de aluminio. Por otro lado, se corroboró que la cantidad, distribución, profundidad, tamaño y dirección de elongación de los huecos o cavidades de la superficie de fractura dependen del aporte térmico y el tipo de carga aplicada, respectivamente.

RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS

1. Para la realización de soldaduras de filete en juntas de aluminio con espesores del orden de los 6mm se recomienda apoyarse en las figuras 3.18, 3.21 y 3.26, así como en las relaciones 3.1, 3.2 y 3.3, mediante las cuales se podría predecir la altura o convexidad del cordón, el ancho y la penetración, para determinados valores de intensidad de corriente, velocidad de avance y ángulo de trabajo.
2. Evaluar las uniones soldadas mediante otro ensayo mecánico, tales como resistencia a la fatiga, para corroborar el efecto de la geometría del cordón en las propiedades mecánicas de la unión.
3. Llevar a cabo este procedimiento experimental utilizando otro material de aporte, por ejemplo un electrodo 5356 (Al-5%Mg).
- 4.

REFERENCIAS

1. R. García Hernández, Tesis de Maestría: “Estudio de la Soldabilidad del Aluminio Puro y la Aleación 2024, por medio del Proceso de Soldadura MIG”. 1998 pág. (1-2), (4-11), (12-16) y (41-53).
2. F. Hinojosa Guerrero, Tesis de maestría: “Estudio de la Modificación del Fenómeno de Solidificación en la Soldadura de las Aleaciones de Aluminio 2014-T6 y 6061-T6, Obtenidas por el Proceso de Soldadura MIG, con Arco Eléctrico Indirecto”. 2006 pág. (25-27) y (15-18).
3. F.F. Curiel López, Tesis de Maestría: “Efecto de Tratamientos Térmicos de Envejecido Parcial en la Resistencia Mecánica de la Aleación de Aluminio 6061-T6 Soldada con el Proceso de Soldadura GMAW”. 2007 pág. (3-5), (32) y (35-42).
4. J.L. Murphy, R.A.H, and W.E. Lever: Joint Preparation for Electron Beam Welding Thing Aluminum Alloy 5083. *Welding Journal*, April 1990 p- (125s-132s).
5. M. Ramulu and M.P. Rubert: Gas Tungsten Arc Welding of Al-Li-Cu Alloy 2029, *Welding Journal*, March, 1990, p. (109s-114s).
6. E. Cicala, G.D. Andrzejewski, D. Grevey and S. Ignat: Hot Cracking in Al-Mg-Si Alloy Laser Welding-Operating Parameters and their Effects. *Materials Science and Engineering A*, 2005.
7. V. Malin: Study of Metallurgical Phenomena in the HAZ of 6061-T6 Aluminum Welded Joints, *Welding Journal*, 1995, p. (305s-318).
8. O.R. Myhr, O. Grong, H.G. Fjaer and C.D. Marioara: Modelling of the Microstructure and Strength Evolution in Al-Mg-Si Alloys During Multistage Thermal Processing, *Acta Materialia*, 2004 52 p. (4497-5008).
9. L. Bertini, V.F, and G. Straffelini: Influence of Postweld Treatments on the Fatigue Behavior of Al-alloy Welded Joints. *Int. J. Fatigue*, 1998, 20(10), p. 749-755.
10. J.C. Rangel, M.D. Salvador y J.T. Salcedo: Estudio de la Evolucion de los Precipitados en la Aleación de aluminio 6061-T6 Soldada Mediante el Proceso MIG Madurada Naturalmente Durante 4 años. *Simposio Materia* 2003.

11. V. Valasubramanian, V. Ravisankar and G. Madhusudhan: Effect of postweld aging treatment on fatigue behavior of pulsed current welded AA7075 Aluminum alloy joints. *Journal of materials engineering and performance*. 2007.
12. P.P. Lean Sifuentes: Comparación de las Características de los Materiales de Aporte ER4043 y ER5356 en el Soldeo del Aluminio Empleando el Proceso MIG-P. Pontificia Universidad Católica del Perú. 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. 2007.
13. K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki: Joining Dissimilar Aluminum alloys. *Welding Journal*, April 2006, p. (38-41).
14. C.C Menzemer, P.C. Lam, C.F. Wittell and T.S. Srivatsan: A Study of Fusion Zone Microstructures of Arc-Welded Joints Made from Dissimilar Aluminum Alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2001. 10(2), p. (173-177).
15. A.K. Lakshminarayanan, V. Balasubramanian and K. Elangovan: Effect of Welding Processes on Tensile Properties of AA6061 Aluminum Alloy Joints. Springer. 2007
16. R. Manti, D.K. Dwivedi and A. Agarwal: Microstructure and Hardness of Al-Mg-Si Weldments Produced by Pulse GTA Welding. Springer. 2006
17. Y.S. Tarn y W.H. Yang: Optimisation of the Weld Bead Geometry in Gas Tungsten Arc Welding by the Taguchi Method. *Advanced Manufacturing Technology*. p. (549-5549).
18. I.S. Kim, J.S. Son, C.E. Park, I.J. Kim and H.H. Kim: An Investigation into an Intelligent System for Predicting Bead Geometry in GMA Welding Process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. p. (113-118).
19. P.E. Murray: Selecting Parameters for GMAW Using Dimensional Analisis. *Welding journal*, July 2002. p. (125-131).
20. J.E.T. Salcedo: Optimización de un Procedimiento de Soldadura MIG para la Aleacion de Aluminio AA 6061-T6 a Través del Control del Calor Suministrado. 2000.
21. C.A.B. Irazabal: Investigación de los Fenómenos Metalúrgicos y Comportamiento a la Fatiga de Uniones Soldadas mediante el Proceso MIG de la Aleación AW 7020. 1999.
22. D.S. Nagesh and G.L. Datta: Prediction of the Weld bead Geometry and Penetration in Shielded Metal-arc Welding Using Artificial Neural Networks. *Materials and Design*. 2002.

23. J.R. Flores, Tesis de Maestría: “Estudio del Comportamiento Metalúrgico en la Unión Soldada del Acero Inoxidable AISI 304 Realizado con el Proceso GMAW”. 2004. pág. (81-90) y (112-117).
24. M.V.P. Carai, Manual de Soldadura Eléctrica. Volumen 1. Ed. Limusa. 1991., pág. (91-105), (114-120), (139-147) (213-218) y (243-249).
25. I.Stol: Selecting Manufacturing Processes for Automotive Aluminum Space Frames, *Welding Journal*. February 1994, p-(57-65).
26. STATGRAPHICS Plus for Windows 4.1, Professional Version, Copyright 1994-1999 by Statistical Graphics corp. <http://www.statgraphics.com/>
27. A. P. Bastés, Llabrés, Grima y Pozueta, Universida Politécnica de Cataluña.: Métodos Estadísticos, Control y Mejora de la Calidad, ed. Alfaomega, 1988, pag. 112.
28. C. Montgomery: Diseño y análisis de experimentos. Ed. Iberoamerica, 1991, pp. 183.
29. ASM Handbook, Metals Handbook Volume 6. Welding, Brazing and Soldering. ASM International EEUU, 1993.
30. ASM Handbook, Metals Handbook Volume 2. Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Special-Purpose Materials. EEUU: ASM International EEUU, 1990.
31. ASM Handbook, ninth edition, Metals Handbook Volume 9. Metallography and Microstructures. EEUU: ASM International EEUU, 2004
32. A. Rengifo: Como Obtener el Mejor Desempeño del Equipo en el Proceso de Soldeo MIG/MAG y Efecto de las Variables en el Proceso de Soldadura GMAW MIG/MAG. Instituto de Soldadura West-arco. Boletín Técnico No 29. 2004.
33. W. Tuttle: Understanding Aluminum Welding, *Welding Journal*, April 1990, p. (43-46).
34. T. Anderson: Welding Aluminum Question and Answers, *Welding Journal*, October 2008, p. (12-14), (36-38).
35. ASM Handbook, Metals Handbook Volume 4. *Heat Treating*. EEUU: ASM International EEUU, 1991.
36. T. Anderson: Aluminum Weld HAZ Fundamentals, *Welding Journal*, July 2005, p. (22-24).
37. T. Anderson: Understanding Aluminum Alloys, *Welding Journal*, April 2002, p. (77-80).
38. W. Hufnagel, Manual del aluminio. Ed. Reverté, 1992, pág. (124-126)

39. G.A. Edwards, K. Stiller, G.L. Dunlop and M.J. Couper: The Precipitation Sequence in Al-Mg-Si alloys. *Acta Materialia*, 1998 46 (11) p. (3893-3904).
40. S. Kou “welding Metallurgy”, ed. Wiley interscience 2002, p. (65-81), (131-137), (174-1869), (206-209), (294), (353-370).
41. ANSI/AWS. D1.2- 90, an American National Standard. 1990, Structural Welding Code Aluminum
42. ASTM Standard Test Method for Microharness of Materials. E384, 2006, USA
43. ASTM Standard Test Method of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum.
44. J. A. Bejarano Consideraciones de Diseño y Factores que Afectan el Desempeño de las Uniones Soldadas Bajo Carga Cíclica. 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Octubre de 2007
45. J. G. Sosa, F. M. Perez, C.J. Villalobos y E. S. Puchi: comportamiento a la fatiga de la aleación 6063 envejecida. *Revista de la facultad de ingeniería de la U.C.V.* Vol. 17, No 2, pp. 59-72, 2002