



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

Determinar la influencia de las variables del proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido para reparación de componentes automotrices de aluminio.

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA

PRESENTA



ALBA ITZEL VÁZQUEZ MORALES

CDMX

AÑO 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: Alberto Ingalls Cruz**

VOCAL: **Profesor: Gerardo Arámburo Pérez**

SECRETARIO: **Profesor: Gerardo Sanjuan Sanjuan**

1er. SUPLENTE: **Profesor: Juan Carlos Contreras Guzmán**

2° SUPLENTE: **Profesor: Itzel Reyes Chaparro**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO 007 MANUFACTURA MECÁNICA EDIFICIO D ANEXO DE QUÍMICA

ASESOR DEL TEMA:

M en M Gerardo Arámburo Pérez

SUPERVISOR TÉCNICO:

IQM Sonia Luisa Elena López Maldonado

SUSTENTANTE:

Alba Itzel Vázquez Morales

Agradecimientos:

En las siguientes líneas me gustaría agradecer a todas aquellas personas que estuvieron conmigo ayudándome y dándome su apoyo durante esta etapa, antes que nada, le quiero dar gracias a Dios por darme la sabiduría y paciencia necesaria para cumplir cada uno de mis objetivos.

- Agradezco a mis padres por ser siempre mi apoyo, mi fortaleza y mi impulso en todo momento, porque sin su ayuda no lo hubiera podido lograr, los amo.
- A mi abuelita Bardomiana por que a ella le debo quien soy y aunque no esté a mi lado físicamente lo estará toda la vida.
- A mis hermanos y familia por darme los ánimos necesarios cuando lo necesitaba.
- A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Química por que fueron mi segunda casa durante toda la carrera y en ellas cumplí muchos sueños.
- A mi asesor de tesis y a mi supervisora técnica porque fueron la guía para cumplir este objetivo, gracias por acompañarme en este largo camino.
- A Alan Sánchez porque siempre confió en mí y jamás me dejó sola aun cuando estaba a punto de darme por vencida.
- A mis amigos de la carrera en especial a Alexia, Brenda, Miriam y Saul porque hicieron una estancia llena de momentos felices e inolvidables.

Por último, gracias a las personas que estuvieron en los momentos indicados para darme la mano y seguir en el camino, gracias por cada momento y por cada sonrisa.

Gracias.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	1
Capítulo 1: Introducción	2
Capítulo 2: Antecedentes	4
2.1 El aluminio.....	4
2.1.1 Características físicas, químicas y mecánicas.....	5
2.2 Aleaciones de aluminio y su clasificación.....	6
2.2.1 Uso del aluminio en la industria automotriz.....	8
2.2.2 Tipos de reparaciones en componentes automotrices con soldadura.....	9
2.3 Proceso de soldadura.....	9
2.3.1 Soldadura SMAW	10
2.3.2 Descripción del proceso.....	10
2.3.3 Posiciones para soldar.....	11
2.3.4 Tipos de uniones.....	12
2.3.5 Tipos de soldaduras.....	13
2.3.6 Electrodo revestidos.....	14
2.3.7 Clasificación de electrodos	15
2.3.8 Electrodo de aluminio E 4043	17
2.3.9 Variables en el proceso de soldadura.....	18
2.3.10 Defectos en la soldadura.....	20
2.4 Técnicas de evaluación de la soldadura.....	24
2.4.1 Análisis metalografico.....	25
2.4.2 Caracterización del material por MEB.....	26
2.4.3 Ensayo de dureza.....	27
2.4.4 Ensayo de microdureza.....	28
2.4.5 Ensayo de impacto.....	29
2.4.6 Ensayo de tracción.....	31
2.4.7 Líquidos penetrantes	32

Capítulo 3: Objetivos e hipótesis.....	34
3.1 Objetivos generales.....	34
3.2 Objetivos particulares.....	34
3.3 Hipótesis.....	34
Capítulo 4: Desarrollo experimental del proceso SMAW	35
4.1 Material y equipo	35
4.2 Proceso de limpieza superficial de las placas.....	35
4.3 Preparación mecánica del material a unir.....	36
4.4 Proceso de soldadura (unión de placas)	36
Capítulo 5: Desarrollo experimental de técnicas de evaluación.....	38
5.1 Material y equipo.....	38
5.2 Preparación metalográfica	39
5.3 Caracterización del material por MEB.....	39
5.4 Ensayo de dureza.....	40
5.5 Ensayo de microdureza.....	41
5.6 Ensayo de impacto.....	42
5.7 Ensayo de tracción.....	42
5.8 Líquidos penetrantes	43
Capítulo 6: Resultados y análisis de resultados	44
6.1 Especificaciones del proceso de soldadura SMAW.....	44
6.2 Resultados metalográficos.....	45
6.3 Caracterización química del metal por MEB.....	51
6.4 Ensayo de dureza.....	65
6.5 Ensayo de microdureza.....	69
6.6 Ensayo de impacto.....	73
6.7 Ensayo de tracción.....	75
6.8 Ensayo de líquidos penetrantes	79

Capítulo 7: Discusión de resultados y conclusiones.....	81
Bibliografía.....	84

Índice de tablas

Tabla 2.1. Propiedades físicas del aluminio.....	5
Tabla 2.2. Propiedades químicas del aluminio.....	5
Tabla 2.3. Propiedades mecánicas del aluminio.....	6
Tabla 2.4. Sistema de designación para aleaciones de aluminio “Conformado”.....	7
Tabla 2.5. Sistema de designación para aleaciones de aluminio “Fundición” ...	8
Tabla 2.6. Posiciones para soldar con el proceso de soldadura SMAW.....	12
Tabla 2.7. Interpretación de los primeros dígitos de la clasificación AWS.....	15
Tabla 2.8. Interpretación del tercer dígito de la clasificación AWS.....	16
Tabla 2.9. Significado del cuarto dígito de la clasificación AWS.....	16
Tabla 2.10. Clasificación de los electrodos E 4043.....	17
Tabla 2.11. Composición química del electrodo E 4043.....	17
Tabla 2.12. Aplicaciones y usos del electrodo E 4043.....	18
Tabla 2.13. Tipos de grietas en soldadura SMAW.....	21
Tabla 4.1. Material y equipo para el proceso de soldadura SMAW.....	35
Tabla 5.1. Material y equipo para las técnicas de evaluación.....	38
Tabla 5.2. Aplicaciones de los ensayos de dureza Rockwell.....	40
Tabla 5.3. Ensayos de dureza Rockwell.....	41
Tabla 6.1. Especificaciones del proceso de soldadura.....	44
Tabla 6.2. Valores experimentales del ensayo de dureza en escala Rockwell H de la placa 1 con temperatura de precalentamiento de 100°C y amperaje de 185 A.....	65
Tabla 6.3. Valores experimentales del ensayo de dureza en escala Rockwell H de la placa 2 con temperatura de precalentamiento de 110°C y amperaje de 190A.....	67
Tabla 6.4. Valores experimentales del ensayo de dureza en escala Rockwell H de la placa 3 con temperatura de precalentamiento de 120°C y amperaje de 180A.....	68
Tabla 6.5. Valores experimentales del ensayo de microdureza en la placa 1 con temperatura de precalentamiento de 100°C y amperaje de 185 A.....	69
Tabla 6.6. Valores experimentales del ensayo de microdureza en la placa 2 con temperatura de precalentamiento de 110°C y amperaje de 190 A.....	70

Tabla 6.7. Valores experimentales en el ensayo de microdureza para la placa 3 con temperatura de precalentamiento de 120°C y amperaje de 180 A.....	71
Tabla 6.8. Dimensiones de las probetas para el ensayo de tracción.....	75
Tabla 6.9. Resultados de la prueba de líquidos penetrantes.....	79

Indice de figuras

Figura 2.1. Esquema del circuito de soldadura SMAW.....	11
Figura 2.2. Tipo de uniones en el proceso de soldadura.....	13
Figura 2.3. Tipos de soldaduras.....	14
Figura 2.4. Clasificación de electrodos para soldadura.....	15
Figura 2.5. Componentes del electrodo revestido.....	19
Figura 2.6. Posiciones de grietas en la soldadura.....	21
Figura 2.7. Porosidad esférica agrupada.....	21
Figura 2.8. Porosidad alineada.....	22
Figura 2.9. Porosidad tipo tubería o agujeros de gusano.....	22
Figura 2.10. Inclusión de escoria puntual.....	22
Figura 2.11. Inclusión lineal de escoria.....	22
Figura 2.12. Falta de fusión o fusión incompleta.....	23
Figura 2.13. Penetración Incompleta.....	23
Figura 2.14. Relleno insuficiente.....	23
Figura 2.15. Refuerzo excesivo en corona.....	23
Figura 2.16. Socavado interno.....	24
Figura 2.17. Desalineamiento.....	24
Figura 2.18. Indentador piramidal Knoop e indentación resultante en la pieza de trabajo.....	28
Figura 2.19. Indentador piramidal Vickers e indentación resultante en la pieza de trabajo.....	29
Figura 2.20. Péndulo de Charpy, utilizado para el ensayo de impacto.....	30
Figura 2.21. Máquina de tracción o prensa hidráulica.....	31
Figura 2.22. Desarrollo experimental de la prueba no destructiva de líquidos penetrantes..	33
Figura 4.1 Elementos de un circuito de soldadura SMAW.....	36
Figura 6.1. Microestructura del material base (corte longitudinal)	46
Figura 6.2. Microestructura del material base (corte transversal)	46
Figura 6.3. Microestructura del material en la zona ZAC (zona afectada por el calor).....	47
Figura 6.4. Microestructura del material entre las zonas de material de aporte – línea de fusión - ZAC - material de base	48

Figura 6.5. Microestructura del material de aporte (corte longitudinal)	49
Figura 6.6. Microestructura del material de aporte con presencia de porosidad (corte transversal).....	50
Figura 6.7 . Microestructura del baterial base Al obtenida en MEB.....	51
Figura 6.8. Microestructura dendrítica del material base Al obtenida en MEB.....	51
Figura 6.9.1 Mapeo en la zona del material base Al en EDS, a) Elemento aluminio (Al), b) Elemento silicio (Si).....	55
Figura 6.9.2 Mapeo en la zona del material base Al en EDS, a) Elemento cobre (Cu), b) Elemento hierro (Fe).....	56
Figura 6.9.3 Mapeo en la zona del material base Al en EDS, a) Elemento manganeso (Mn), b) Elemento zinc (Zn).....	57
Figura 6.10. Microestructura de la zona de soldadura (material de aporte), obtenida en MEB.....	58
Figura 6.11. Microestructura de la zona de soldadura con los puntos de espectros señalados (material de aporte), obtenida en MEB.....	58
Figura 6.12.1 Mapeo en la zona del material de aporte en EDS, a) Elemento aluminio (Al), b) Elemento silicio (Si).....	63
Figura 6.12.2 Mapeo en la zona del material de aporte en EDS, a) Elemento manganeso (Mn), b) Elemento zinc (Zn).....	64
Figura 6.12.3 Mapeo en la zona del material de aporte en EDS, a) Elemento hierro (Fe), b) Elemento cobre (Cu).....	64
Figura 6.13. Fractura de la sección 1 de la probeta del ensayo de impacto.....	73
Figura 6.14. Fractura de la sección 2 de la probeta del ensayo de impacto-.....	73
Figura 6.15. Fotografía de la probeta fracturada por el ensayo de impacto.....	73
Figura 6.16. Fractura de la sección 1 de la probeta sin defecto utilizada en el ensayo de tracción.....	75
Figura 6.17. Fractura de la sección 2 de la probeta sin defecto utilizada en el ensayo de tracción.....	75
Figura 6.18. Fotografía de la probeta fracturada por el ensayo de tracción.....	75
Figura 6.19. Fractura de la sección 1 de la probeta utilizada en el ensayo de tracción con presencia de óxido y escoria.....	77

Figura 6.20. Fractura de la sección 2 de la probeta utilizada en el ensayo de tracción con presencia de óxido y escoria.....	77
Figura 6.21. Fotografía de la probeta fracturada por el ensayo de tracción.....	77

Índice de gráficos.

Gráfico 6.1. Microanálisis químico del material base Al - Si en el punto 554, obtenido por EDS.....	52
Gráfico 6.2. Microanálisis químico del material base Al – Si en el punto 555, obtenido por EDS.....	53
Gráfico 6.3. Microanálisis químico del material base Al – Si en el punto 556, obtenido por EDS.....	54
Gráfico 6.4. Microanálisis químico del material base Al – Si en el punto 557, obtenido por EDS.....	54
Gráfico 6.5. Microanálisis químico del material de aporte en el punto 581, obtenido por EDS.....	59
Gráfico 6.6. Microanálisis químico del material de aporte en el punto 582, obtenido por EDS.....	60
Gráfico 6.7. Microanálisis químico del material de aporte en el punto 583, obtenido por EDS.....	61
Gráfico 6.8. Microanálisis químico del material de aporte en el punto 584, obtenido por EDS.....	62
Gráfico 6.9. Barrido de las durezas en escala HRH en las diferentes zonas de estudio en la placa 1 con temperatura de precalentamiento de 100°C y amperaje de 185A.....	66
Gráfico 6.10. Barrido de las durezas en escala HRH en las diferentes zonas de estudio en la placa 2 con temperatura de precalentamiento de 110°C y amperaje de 190A.....	67
Gráfico 6.11. Barrido de las durezas en escala HRH en las diferentes zonas de estudio en la placa 3 con temperatura de precalentamiento de 120°C y amperaje de 180A.....	68
Gráfico 6.12. Barrido de las microdurezas en las diferentes zonas de estudio en la placa 1 con temperatura de precalentamiento de 100°C y amperaje de 185A.....	69
Gráfico 6.13. Barrido de las microdurezas en las diferentes zonas de estudio en la placa 2 con temperatura de precalentamiento de 110°C y amperaje de 190A.....	70
Gráfico 6.14. Barrido de las microdurezas en las diferentes zonas de estudio en la placa 3 con temperatura de precalentamiento de 120°C y amperaje de 180A.....	71

Resumen

La transición del uso del acero hacia el aluminio es una realidad en los procesos de manufactura dentro de la industria automotriz, la cual tiene como objetivo disminuir el peso de las piezas. Después del acero, el aluminio resulta el metal más utilizado en la industria del automóvil.

Actualmente en la industria automotriz se fabrican más de 100 piezas diferentes en aleaciones base aluminio y el número va con trayectoria ascendente, la evolución de este sector se debe en gran parte a la introducción del aluminio y sus aleaciones. Ya que, de acuerdo con sus excelentes propiedades; densidad, maleabilidad, bajo punto de fusión, resistencia a la corrosión, el aluminio se ha convertido en un elemento fundamental en el desarrollo en esta industria.

El aluminio cuenta con excelentes propiedades mecánicas, químicas y físicas por lo que es posible realizar reparaciones a las piezas por medio del proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW “shield metal arc welding” por sus siglas en ingles), el cual es un proceso rápido, eficaz y que, con un adecuado control de variables puede llegar a tener altos estándares de calidad.

Por tal motivo este escrito trata del proceso SMAW y la importancia que tiene en la industria automotriz, para fabricación y reparación de piezas en este sector.

Capítulo 1: Introducción

Hace ya más de 150 años que el hombre descubrió el aluminio, debido a que este material cuenta con excelentes propiedades físicas, químicas y mecánicas que lo hacen ideal para trabajar y reducir costos de producción, sin la necesidad de disminuir la calidad del producto obtenido. Surgieron múltiples formas de usarlo en diferentes tipos de industria de electrodomésticos y claro, la automotriz, de la cual trataremos en este trabajo.

Actualmente en la industria automotriz se utiliza este material para la fabricación de varias piezas, como: chasis, puertas, suspensión, parachoques, “monoblok” y tren motriz, entre otros. Según diversas fuentes del medio automovilístico, la introducción del aluminio como material para la fabricación de autopartes fue casi inmediata a su descubrimiento, tal es el ejemplo del ingeniero Carl Benz, famoso por haber sido el primer fabricante de un automóvil con motor de combustión interna y utilizando en el mismo diversas piezas hechas de aluminio.

En esta industria, los ingenieros constataron que este metal debía ser usado para la fabricación en masa de automotores, ya que ofrece una mayor eficiencia en el rendimiento de combustibles, debido a la densidad que en el caso del aluminio es mucho menor al del acero. Del mismo modo y compitiendo con el mismo metal, se pudo apreciar que ofrece mayor seguridad a los conductores gracias a que puede absorber dos veces más energía durante una colisión. Por último es importante mencionar que el aluminio puede ser reciclado, lo que disminuye los costos de producción.

Con base en lo anterior se puede notar cómo la utilización de este metal ha ido en aumento dentro de la fabricación de vehículos, de tal modo que en 2013, Ford Motor Company presentó su vehículo pick-up insignia F150, con un chasis fabricado en aluminio, lo cual generó una reducción de un 39% en relación al peso de la unidad, lo que significa 700 libras menos en peso y una mayor eficiencia en el uso de combustible.

Por este motivo en la actualidad el estudio de este material y sus aplicaciones siguen vigentes, de tal modo que a lo largo de este trabajo se describe el método de soldadura aplicado a la industria automotriz.

Basados en estudios teórico-prácticos del proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido, este proceso sigue siendo utilizado en la industria automotriz, debido a sus características, ventajas y aplicaciones en comparación con otros procesos de soldadura aplicados en esta industria.

Capítulo 2: Antecedentes

2.1 El aluminio

El aluminio es el más abundante de los metales, constituyendo cerca del 8% de la corteza terrestre; su símbolo químico es Al y su número atómico 13. Se trata de un metal no ferromagnético. En estado natural se encuentra en muchos silicatos. Como metal se extrae únicamente del mineral conocido con el nombre de bauxita ($\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 \cdot (\text{OH})$), por transformación primero en alúmina (Al_2O_3) mediante el proceso “Bayer” obteniendo Al_2O_3 el cual se somete a un proceso electrolítico llamado “Hall- Héroult” para obtener aluminio metálico [10].

El aluminio es un metal de propiedades mecánicas bajas, correctamente aleado se pueden obtener aleaciones con propiedades comparables al acero, por lo cual se ha convertido en un metal muy útil en toda la industria, estando presente en sectores como la aeronáutica, construcción, decoración, minería, industria automotriz, entre otros.

El aluminio es el único metal que proporciona dureza con baja densidad, tiene propiedades características como la tenacidad, la ductilidad y la maleabilidad, además posee una alta resistencia a la corrosión y buena conductividad térmica y eléctrica.

2.1.1 Características físicas, químicas y mecánicas

En las tablas 2.1, 2.2 y 2.3 se enlistan las propiedades físicas, químicas y mecánicas del aluminio en estado puro.

Tabla 2.1 *Propiedades físicas del aluminio. [28]*

Propiedades físicas del aluminio	
Color	Gris Plata
Peso atómico	26.9815 g/mol
Densidad	2.7 kg/m ³
Punto de fusión	660°C
Punto de ebullición	2480°C
Conductividad eléctrica	34 y 38 m/(Ω mm ²)
Conductividad térmica	80 a 230 W/(m•K)

Tabla 2.2. *Propiedades químicas del aluminio. [28]*

Propiedades químicas del aluminio	
Nombre	Aluminio
Símbolo	Al
Valencia	3
Estado de oxidación	3+
Electronegatividad	1.5

Tabla 2.3. *Propiedades mecánicas del aluminio. [28]*

Propiedades mecánicas del aluminio	
Dureza	20 HB
Maleabilidad	Alta
Límite de resistencia en tracción (Aluminio puro)	160-200 MPa
Límite de resistencia en tracción (Aluminio aleado)	1.4-1,400 MPa

2.2 Aleaciones de aluminio y su clasificación

Las aleaciones de aluminio ocupan el segundo lugar (después de los aceros) en los materiales que se utilizan con fines estructurales. Tiene una densidad de sólo 2.7 g/cm^3 (aproximadamente un tercio del acero (7.83 g/cm^3)). Esta baja densidad, junto con la alta resistencia en algunas aleaciones de aluminio, próxima o similar a la de algunos aceros estructurales como el acero A36, permite la construcción de estructuras ligeras y resistentes, particularmente ventajosas en vehículos espaciales, aviones, y en todo tipo de vehículos terrestres y náuticos [28]. El aluminio resiste el tipo de corrosión que causa en los aceros una degradación progresiva. La superficie expuesta del aluminio se combina con el oxígeno de la atmósfera, formando una película de óxido de aluminio.

Para su estudio, es conveniente dividir las aleaciones de aluminio en dos grandes categorías [5]:

- Aleaciones de aluminio para fundición.
- Aleaciones de aluminio para conformado.

En la mayoría de los países se utilizan sistemas numéricos de cuatro dígitos para identificar las aleaciones de aluminio. El primer dígito indica el grupo de aleación y los dos últimos identifican la aleación de aluminio o indican la pureza de éste. El segundo dígito indica modificaciones realizadas sobre la aleación original o límites de impurezas [5]. El sistema de

designación completo para aleaciones de aluminio para conformado y moldeo se muestran en las tablas 2.4 y 2.5.

Tabla 2.4. Sistema de designación para aleaciones de aluminio “Conformado” [5].

Aleaciones de aluminio para conformado		
Serie	Principal(es) Aleante(s)	Termotratables
1XXX	Aluminios puros (99% min)	NO
2XXX	Cobre	SI
3XXX	Manganeso	NO
4XXX	Silicio	NO
5XXX	Magnesio	NO
6XXX	Magnesio – Silicio	SI
7XXX	Zinc	SI
8XXX	Otros	-----



Tabla 2.5. Sistema de designación para aleaciones de aluminio “Fundición” [5].

Aleaciones de aluminio para molde		
Serie	Principal(es) Aleante(s)	Termotratables
1XX.X	Aluminios puros (99% min)	NO
2XX.X	Cobre	SI
3XX.X	Cobre – Silicio	LA MAYORIA
4XX.X	Silicio	SOLO ALGUNAS
5XX.X	Magnesio	NO
6XX.X	Fuera de uso	---
7XX.X	Zinc	SI
8XX.X	Estaño	SI
9XX.X	Litio	---



2.2.1 Uso del aluminio en la industria automotriz

En la industria automotriz el porcentaje de uso de aluminio ha incrementado en la elaboración de diferentes elementos mecánicos, su uso más generalizado se centra en la fabricación de todo tipo de bombas, cabezas y “monoblock” (bloques de motor), rines, ejes de transmisión, entre otros [14].

Sin embargo, la fabricación de carrocerías ocupa el primer lugar de los componentes automotrices fabricados con aluminio, esto se puede explicar por las excelentes propiedades físicas y mecánicas (ver tablas 2.1 y 2.3) de este material. Los nuevos vehículos se benefician de la baja densidad y alta rigidez del aluminio, así como de su alta resistencia a la corrosión, entre otras ventajas, como se ha mencionado previamente y gracias a esto se ha conseguido reducir el peso de los vehículos hasta en un 40%.

Otras ventajas del aluminio en la industria automotriz:

- Es reciclable, lo que evita residuos y protege al medio ambiente. Además, su uso contribuye a reducir emisiones contaminantes [17].
- Resistencia a la corrosión: la facilidad que tiene el aluminio de reaccionar con el oxígeno da como resultado una capa de óxido de aluminio la cual es una capa compacta y resistente a la corrosión que al generarse en la superficie de manera uniforme protege al material.
- Maleabilidad y facilidad de trabajar: El aluminio es un metal ligero, dúctil y maleable, aleado puede incrementar su resistencia de tracción. Es fácil de trabajar por lo que puede ser laminado hasta 0.004 mm de espesor. Por otra parte, es un excelente conductor del calor y de la electricidad [17].
- Las carrocerías fabricadas con aluminio resultan más rígidas que las de acero.

2.2.2 Tipos de reparaciones en componentes automotrices con soldadura

En la industria automotriz los métodos de soldadura más empleados en reparaciones son [14]:

- Soldadura eléctrica por arco de hilo, MIG y MAG.
- Soldadura eléctrica por puntos de resistencia, método de soldadura autógeno.

Existen métodos menos utilizados como *la soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido*. Actualmente en la industria automotriz las reparaciones más comunes por medio del método de soldadura son:

- Bombas de agua (sistema de refrigeración), cuando existe alguna fisura
- En el “monoblock” cuando existe presencia de fisura o fractura
- En carrocerías por fisura, fractura o desgaste del mismo metal.

2.3 Proceso de soldadura

La soldadura por fusión es un proceso para unir metales aplicando para ello calor, presión o ambos, en la zona de empalme, con el fin de causar la coalescencia de las áreas adyacentes. Un buen trabajo de soldadura queda igual de fuerte como el metal original.

La soldadura por fusión se efectúa en operaciones manuales, semiautomáticas o automáticas, dependiendo principalmente de la cantidad y diversidad del trabajo a efectuarse. Ha sustituido casi totalmente al remachado para fabricar calderas, reactores a presión, tanques y secciones estructurales para puentes y edificios; también es el principal medio empleado para unir firmemente tableros y elementos para la construcción de carrocerías de automóviles; ha ocupado el lugar de las piezas coladas en una proporción importante.

2.3.1 Soldadura SMAW

El proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido, identificado como SMAW por sus siglas en inglés “Shielded Metal Arc Welding”, es un proceso en el que se unen dos metales mediante una fusión localizada producida por un arco eléctrico entre las piezas a soldar y un electrodo metálico recubierto [20].

El sistema utiliza una fuente de calor (arco eléctrico), mediante el cual es posible la fusión del metal de aporte y material base y un medio gaseoso generado por la combustión del revestimiento del electrodo, encargado de proteger el metal fundido, generando con esto una unión metálica resistente a esfuerzos mecánicos.

2.3.2 Descripción del proceso

El proceso de soldadura por arco metálico con electrodo revestido SMAW se caracteriza porque produce un arco eléctrico entre la pieza a soldar y un electrodo metálico revestido. El arco eléctrico genera el calor necesario para fundir el material de aporte y el material base, dando origen a la unión de los materiales mediante una mezcla de ambos metales líquidos que al solidificar forman el cordón de soldadura [8].

Con el calor generado en el arco eléctrico se funde la punta del electrodo y se quema el revestimiento de este, produciendo una atmósfera protectora contra el medio ambiente, que protegerá al proceso de soldadura. La temperatura que se genera en este proceso de soldadura por arco eléctrico puede alcanzar hasta los 5000°C, dependiendo del material con el que se trabaje y las condiciones de trabajo [1].

La corriente eléctrica que se utiliza en el proceso puede ser directa o alterna según sea el material a trabajar, en el caso del aluminio, que es nuestro metal de interés se utiliza la corriente directa.

En el arco, las gotas del metal fundido se depositan mezcladas con escoria fundida procedente del revestimiento que, por efecto de la tensión superficial, densidad y de la viscosidad flota a la superficie, formando una capa de escoria, eliminando la reacción de los contaminantes del material, el oxígeno y la humedad del ambiente protegiendo así al metal fundido y regulando la velocidad de enfriamiento del metal de aporte.



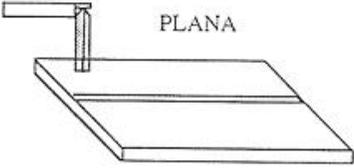
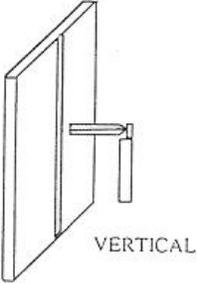
Figura 2.1 Esquema del circuito de soldadura SMAW [1].

2.3.3 Posiciones para soldar

Una de las ventajas importantes del Proceso de Soldadura (SMAW) es que puede soldarse en cualquier posición en la mayoría de los materiales. A pesar de esta ventaja, es preferible soldar en posición plana siempre que resulte práctico, ya que se requiere menor habilidad y es posible usar electrodos más grandes que ofrecen mayores tasas de depósito. Las soldaduras en posición vertical, horizontal o por encima de la cabeza “cenital” ver tabla 2.6, requieren de mayor habilidad por parte del soldador y se realizan con electrodos de menor diámetro [25].

En la tabla 2.6 se muestran de manera esquemática las posiciones que se usan comúnmente para soldar.

Tabla 2.6. Posiciones para soldar con el proceso de soldadura SMAW [25].

Posiciones para soldar	
Plana	
Vertical	
Horizontal	

2.3.4 Tipos de uniones

Las uniones soldadas se diseñan considerando la resistencia mecánica y la seguridad que la pieza soldada debe ofrecer en las condiciones de servicio a las que se someterá. Siempre debe considerarse dirección, magnitud, tipo, etc. en la que se aplicarán los esfuerzos y la temperatura a la que se expondrá la pieza soldada.

Hay cinco tipos básicos de uniones [19]:

- Esquina: las partes de la unión forman un ángulo de 90° entre ellas
- A tope: las partes de unión se encuentran en el mismo plano y se unen los bordes
- Borde. Las partes están paralelas con al menos uno de sus bordes en común y la unión se hace en él.
- Traslape o solape: Ambas partes se sobreponen para ser unidas
- Forma de T: un de las partes se coloca perpendicular a la otra.

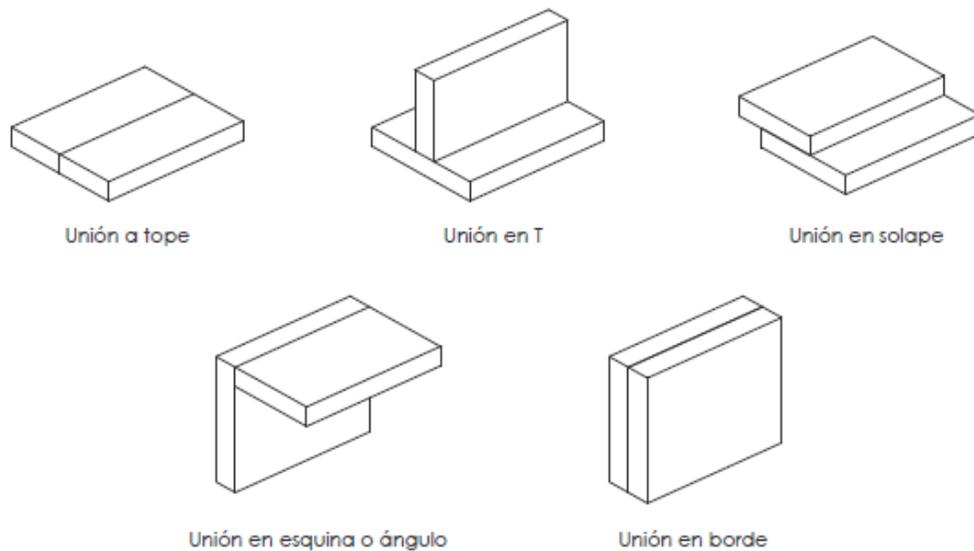


Figura 2.2. Tipo de uniones en el proceso de soldadura [19].

2.3.5 Tipos de soldaduras [19]

- Filete: Se utiliza para rellenar los bordes de las placas creadas mediante uniones de esquina, tope y en T.
- Ranura: Generalmente se requiere moldear las orillas de las partes a unir en un surco para facilitar la penetración de la soldadura. Este moldeo se conoce como bisel y sus formas más comunes son bisel, "V", "U" y "J" en los lados sencillos o dobles.
- Tapón: Se usa para unir placas utilizando una o más ranuras en la parte superior.
- Cordón: Se realiza depositando el material de aporte con el desplazamiento del electrodo revestido en la unión de las placas de manera unidireccional.
- Ondeada: Se logra haciendo un cordón de soldadura con movimiento lateral del electrodo revestido. Su ancho depende del diseño o necesidad.

Los primeros dos tipos de soldadura hacen referencia a la geometría de bisel, la de tapón se refiere a la función de la soldadura, mientras que la de cordón y ondeada se relacionan con el desplazamiento del electrodo.

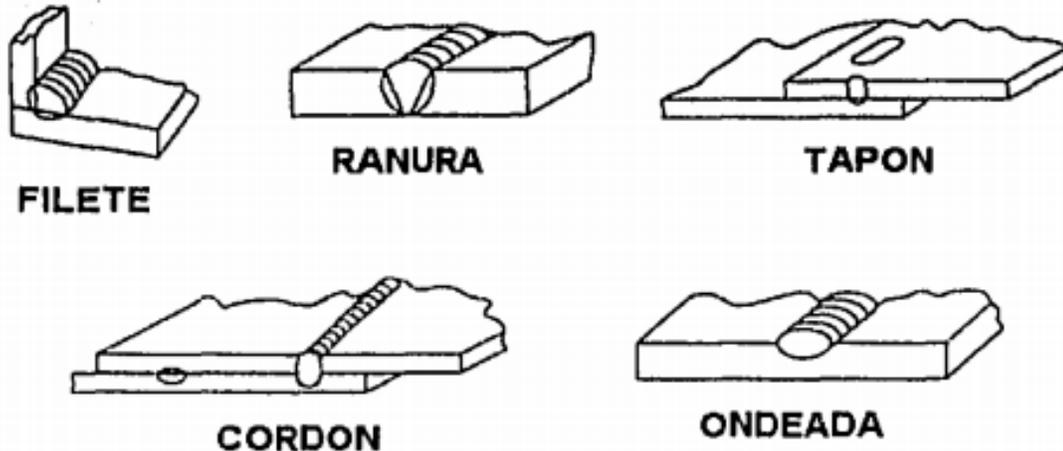


Figura 2.3. Tipos de soldaduras [19].

2.3.6 Electrodo Revestidos

La mayor parte de los electrodos para SMAW tienen un núcleo de metal sólido. Aunque también existen electrodos que se elaboran con un núcleo compuesto de metal en polvo compactados en el revestimiento; el propósito de los polvos metálicos, es producir un depósito de soldadura de aleación.

La cobertura de los electrodos para la soldadura de arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) se aplica por el método de extrusión o bien por el de inmersión. En todos los casos, la cobertura contiene la mayor parte de los materiales de protección, limpieza y desoxidación.

El electrodo tiene la función de establecer el arco y proporcionar metal de aporte para el depósito de soldadura, en el revestimiento del electrodo se introducen otros elementos aleantes, los cuales tienen la función de ser elementos compensadores en la fusión de los materiales (material de aporte y material base) [7]. Dependiendo del tipo de electrodo que se usa, la cobertura desempeña una o más funciones.

Cabe mencionar que el material base determina o delimita el tipo de electrodo a usar para el proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestidos. Esto dependerá de la composición química y de las propiedades físicas y químicas del metal base.

2.3.7 Clasificación de electrodos

Los electrodos tiene una nomenclatura la cual se describe en la figura 2.4.

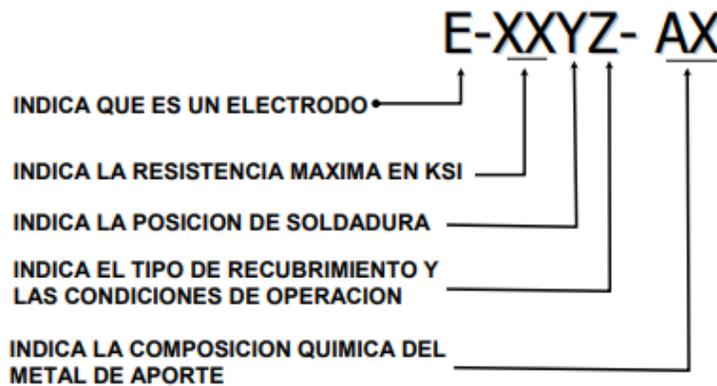


Figura 2.4. Clasificación de electrodos para soldadura [7].

Tabla 2.7. Interpretación de los primeros dígitos de la clasificación AWS [7].

E-XYZ	
Los dígitos indican la resistencia máxima del metal depositado.	
Si los dígitos son:	Significa que el metal tiene una resistencia mínima de
60	60,000 libras por pulgada cuadrada (psi)
70	70,000 libras por pulgada cuadrada (psi)
80	80,000 libras por pulgada cuadrada (psi)
90	90,000 libras por pulgada cuadrada (psi)
100	100,000 libras por pulgada cuadrada (psi)
120	120,000 libras por pulgada cuadrada (psi)

Tabla 2.8. Interpretación del tercer dígito de la clasificación AWS [7].

E-XXYZ

El dígito indica la posición en la que se puede emplear el electrodo

Si el dígito es:	Significa que el electrodo se aplica para:
1	Soldar ranuras y filetes en toda posición (plana, horizontal, vertical y sobrecabeza)
2	Soldar ranuras en posición plana y filetes en posición plana y horizontal
3	Soldar ranuras y filetes únicamente en la posición plana

Tabla 2.9. Significado del cuarto dígito de la clasificación AWS [7].

E-XXYZ

El dígito puede ser del 1 al 8 e indica las características del recubrimiento y la polaridad con la que se puede emplear el electrodo.

Si el dígito es:	Significa que el recubrimiento es:	Corriente a emplear	La polaridad debe de ser:
0	Sódico Celulósico	DC (Corriente Directa)	EP (Electrodo a positivo)
1	Potásico celulósico	AC/DC (Alternativa o Directa)	EP (Electrodo a positivo)
2	Rutílico sódico	AC/DC (Alternativa o Directa)	EP (Electrodo a positivo)
3	Rutílico potásico	AC/DC (Alternativa o Directa)	EP (Electrodo a positivo)
4	Rutílico con polvo de Fe	AC/DC (Alternativa o Directa)	EP (Electrodo a positivo)
5	Bajo en hidrógeno sódico	DC (Corriente Directa)	EP (Electrodo a positivo)
6	Bajo en hidrógeno potásico	AC/DC (Alternativa o Directa)	EP (Electrodo a positivo)
7	Óxido de hierro sódico	AC/DC (Alternativa o Directa)	
8	Bajo en hidrógeno con polvo de Fe	AC/DC (Alternativa o Directa)	EP (Electrodo a positivo)

2.3.8 Electrodo de aluminio E 4043 (Al-Si5).

El electrodo E 4043 es un electrodo de aluminio con 5% de silicio, diseñado para ensambles y reparación de piezas de aluminio o aleaciones de aluminio. Presenta una excelente resistencia a la corrosión, una débil porosidad y buenas propiedades mecánicas [18].

- **Clasificación**

Tabla 2.10. *Clasificación de los electrodos E 4043 [18].*

Clasificación del E 4043
ISO 18273: Al 4043 ^a
AWS A 5.3: E4043
DIN 1732: EI-AlSi5

- **Composición química**

Tabla 2.11. *Composición química del electrodo E 4043 [18].*

Composición química	
Aluminio	Base
Silicio	4.5 – 6.0 %
Hierro	0.80 % máx
Cobre	0.30 % máx
Manganeso	0.05 % máx
Magnesio	0.05 % máx
Zinc	0.10 % máx
Otros elementos	0.20 % máx

- **Aplicaciones**

Tabla 2.12. *Aplicaciones y usos del electrodo E 4043 [18].*

Aplicaciones del E 4043
Aleaciones de fundiciones
Bloques de motor
Tanques de almacenamiento
Contenedores
Industria marítima y química.

2.3.9 Variables del proceso de soldadura.

Hay variables que influyen directa o indirectamente en la generación del cordón de soldadura y en su calidad:

- Intensidad de corriente (A):

Cada electrodo, en función de su diámetro, tiene especificado un rango o parámetro de intensidades en el cual puede utilizarse. Éste, además de estar en función del diámetro también dependerá de la composición del mismo. Cuanto mayor sea la intensidad utilizada mayor será el calor producido y la cantidad de depósito del material. La intensidad de corriente a utilizar dependerá del espesor de la pieza, de la posición para soldar y del tipo de unión.

- Diámetro del electrodo:

Se debe seleccionar el electrodo de mayor diámetro posible que asegure los requisitos de aporte másico y que permita un fácil manejo. Esta elección debe hacerse en función del espesor del material a soldar, del tipo de unión y de la posición [21].

- Tipo de revestimiento:

Las funciones que cumple el revestimiento son las siguientes [15]:

- Indicar las condiciones de trabajo del electrodo.
- Provee un gas para proteger el metal fundido y los materiales a unir. Así como para evitar una contaminación excesiva del metal de aporte fundido.
- Suministrar agentes fundentes y desoxidantes para limpiar la soldadura y evitar el crecimiento de granos en el metal de soldadura.
- Proporciona un manto de escoria que protege el metal de la soldadura, regulando la velocidad de enfriamiento, las propiedades mecánicas y la limpieza superficial de dicho metal.
- Constituye un medio para compensar elementos de aleación que modifiquen las propiedades mecánicas del metal de soldadura.

- Posición del electrodo:

La posición del electrodo queda definida por dos ángulos: el ángulo de inclinación longitudinal y el ángulo de inclinación lateral. En la soldadura de electrodos revestidos, el amperaje se determina por el diámetro del electrodo y del tipo de revestimiento además el voltaje por la longitud del arco [23]. El electrodo está constituido por distintos componentes como se observa en la figura 2.5.

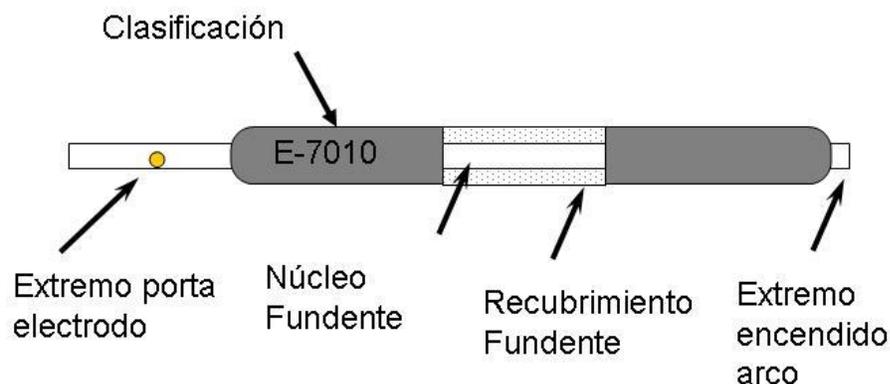


Figura 2.5. Componentes del electrodo revestido [23].

- Precalentamiento del material base:

Precalentar los materiales a unir en algunos casos puede ayudar a evitar la formación de fisuras en el material durante la soldadura. La temperatura de precalentamiento no debe superar los 120°C para evitar la formación de óxidos, se recomienda utilizar un indicador de temperatura para prevenir sobrecalentamiento. Además, la colocación de puntos de soldadura al principio y al final de la placa.

- Técnica de empuje o arrastre:

En el proceso de soldadura la técnica de empuje es una variable modificable por el operador, al mejorar la técnica se reduce la oxidación del material, aumenta la limpieza y mejora la calidad de la soldadura.

- Velocidad de desplazamiento:

La velocidad de desplazamiento (aporte) en la soldadura se establece por el material a soldar y el material de aporte, tipo de preparación y parámetros de operación (amperaje, voltaje y temperatura de precalentamiento).

En el proceso de soldadura de aluminio es necesario que se realice de manera rápida para evitar la oxidación y disminuir la porosidad. A diferencia del acero, la alta conductividad térmica del aluminio determina el ajuste de los parámetros de operación. A mayor calor producido en el arco, las velocidades de desplazamiento serán mayores, siempre tomando en consideración el diámetro del electrodo. Si la velocidad de desplazamiento es demasiado lenta, el soldador se arriesga a perforar el material base.

2.3.10 Defectos en la soldadura.

El objetivo del proceso de soldadura de aluminio es unir dos o más componentes en una sola estructura; por lo tanto, la integridad física de ésta depende de la calidad de la unión. La clasificación de los defectos de soldadura que se utilizará está establecida por el IIW “International Institute of Welding” y se clasifican en seis series:

- Serie 100: Grieta.

Estas son discontinuidades en la soldadura misma o en el metal base adyacente a la soldadura. Este tipo de defectos produce una importante reducción en la resistencia de la soldadura.

Tabla 2.13. *Tipos de grietas en soldadura SMAW [22].*

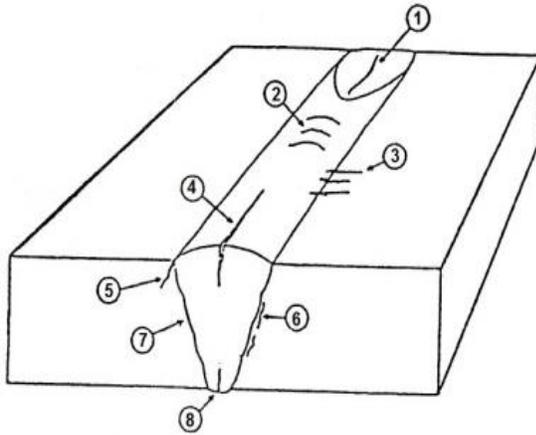


Figura 2.6. *Posiciones de grietas en la soldadura [22].*

Tipos de grietas	
1	Grieta en el cráter
2	Grieta transversal en el metal de aporte
3	Grieta transversal en la ZAC (Zona Afectada por el Calor)
4	Grieta longitudinal en el metal de aporte
5	Grietas en el borde del cordón de soldadura
6	Grieta bajo el cordón en la Zona Afectada por el Calor
7	Grieta en la línea de fusión
8	Grieta en la raíz de la soldadura

- Serie 200: Porosidades.

Éstas incluyen diversos defectos de porosidad y contracción, consiste en defectos formados por gases atrapados durante la solidificación. Pueden tener forma esférica (huecos en forma de burbuja) o alargada (huecos en forma de gusano) [3].

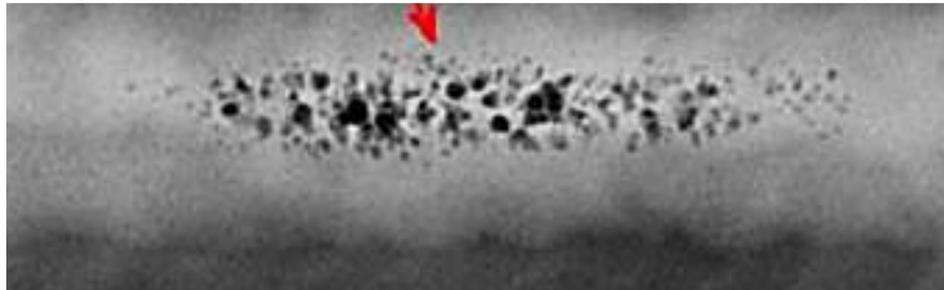


Figura 2.7. *Porosidad esférica agrupada [3].*

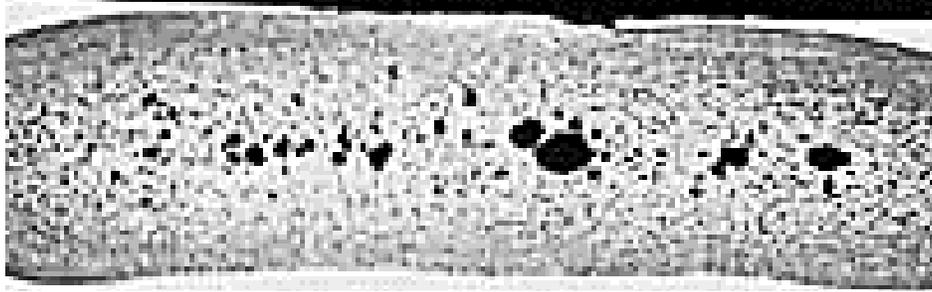


Figura 2.8. *Porosidad alineada [3].*

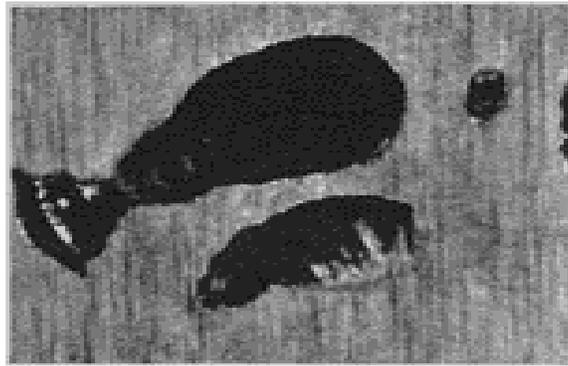


Figura 2.9. *Porosidad tipo tubería o agujeros de gusano [7].*

- 300: Inclusiones sólidas.

Éstas son materiales sólidos no metálicos atrapados en el metal de la soldadura. La forma más común son las partículas de escoria que en lugar de flotar en la parte superior del charco de la soldadura, se quedan atrapados durante la solidificación del metal o bien por una mala limpieza entre los pasos de una soldadura [3].



Figura 2.10. *Inclusión de escoria puntual [3].*

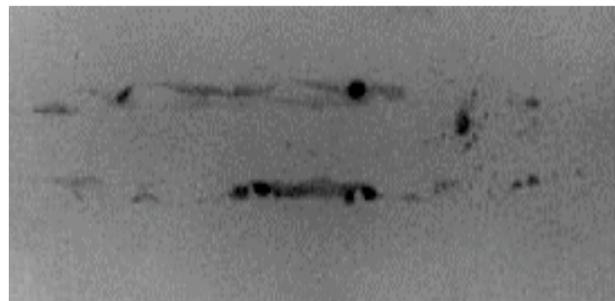


Figura 2.11. *Inclusión lineal de escoria [3].*

- Serie 400: Fusión o penetración incompleta.

Esta carencia de fusión es simplemente una discontinuidad en la cual no hay fusión a través de alguna sección transversal de la unión. La penetración incompleta hace referencia a la profundidad la cual alcanza la soldadura dentro del metal base de unión. Una falta de penetración significa que la fusión no penetró lo suficiente en la raíz de unión en relación con las normas especificadas, dejando visibles las caras del metal base [7].

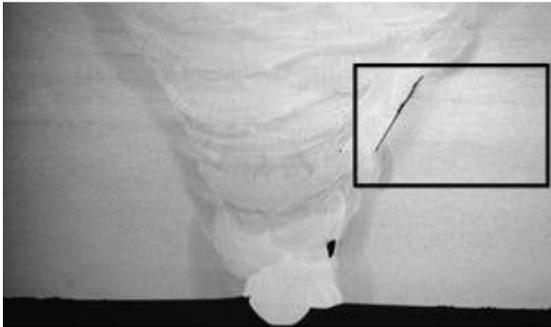


Figura 2.12. Falta de fusión o fusión incompleta [7].

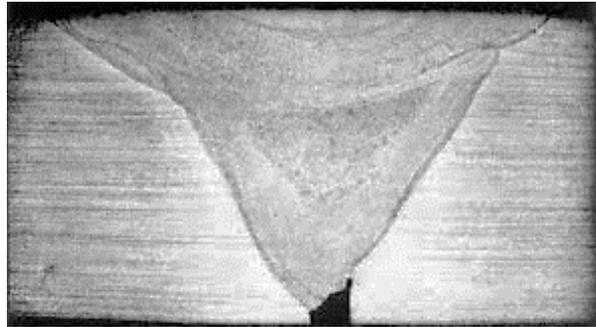


Figura 2.13. Penetración incompleta [7].

- Serie 500: Forma imperfecta o contorno inaceptable.

La soldadura debe de tener cierto perfil o forma para alcanzar una máxima resistencia de la unión soldada, se debe evitar la fusión incompleta y la falta de penetración, así como excesos o falta de material depositado.

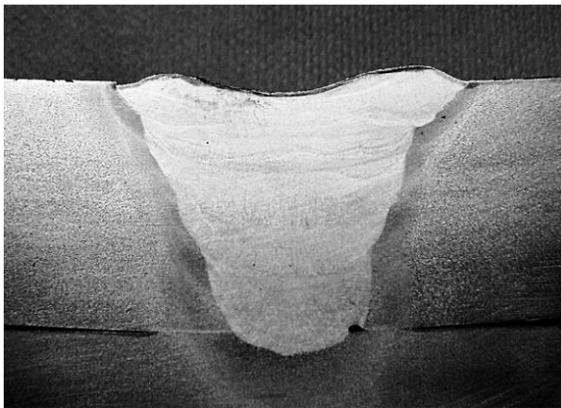


Figura 2.14. Relleno insuficiente [7].

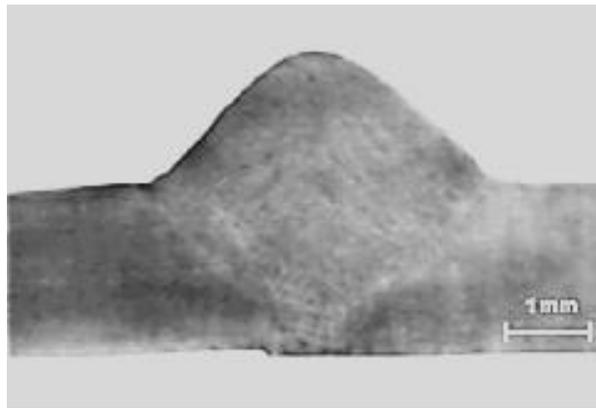


Figura 2.15. Refuerzo excesivo en corona [3].

- Serie 600: Defectos diversos.

En esta categoría están los golpes de arco, en los cuales el soldador accidentalmente permite que el electrodo toque el metal base junto a la unión, dejando salpicadura excesiva, en la cual caen gotas del metal de soldadura fundido en la superficie del metal base y otros defectos no incluidos en categorías anteriores como socavado interno [7] (ver figura 2.16) y desalineamiento (ver figura 2.17).

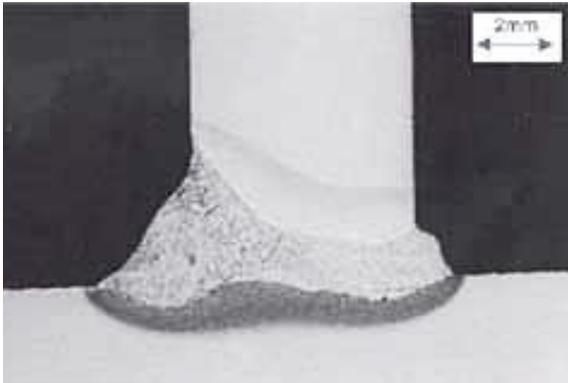


Figura 2.16. Socavado interno [7].

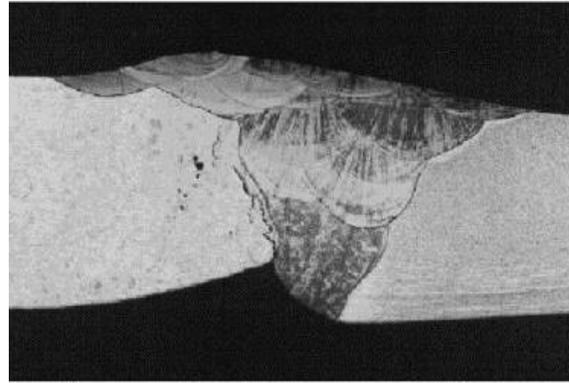


Figura 2.17. Desalineamiento [7].

2.4 Técnicas de evaluación de la soldadura.

Se pueden evaluar distintos factores durante la inspección de soldadura, algunos relacionados con su tamaño, otros con la falta de continuidad del cordón, con respecto a sus propiedades mecánicas. Estas imperfecciones dentro o cercanas a la soldadura, pueden afectar a la calidad de la misma, según su tamaño, ubicación evitando que la soldadura cumpla con los requisitos solicitados.

Cuando la falta de continuidad tiene un tamaño o ubicación inaceptable, se denominan defecto de la soldadura, ya que por sus características pueden ocasionar la falla prematura de la soldadura a través de la reducción de la resistencia mecánica o produciendo concentraciones de esfuerzos dentro del componente de la soldadura. Por esta razón, es de suma importancia que se realice el proceso de inspección de la soldadura.

Las razones por la cual se lleva a cabo la inspección de soldadura son, el control de la calidad que tiene. Los criterios aceptables e inaceptables de los defectos de la soldadura en la inspección, usualmente se obtienen de normas “AWS” y código “ASME” dependiendo del uso final del componente soldado.

Para el proceso de inspección de soldadura se pueden realizar dos tipos de ensayos, los ensayos destructivos y no destructivos:

- Ensayos destructivos: Son pruebas utilizadas para establecer la integridad o desempeño de la soldadura típicamente mediante el corte o ruptura del componente soldado para evaluar las distintas características mecánicas o físicas.
- Ensayos no destructivos, por sus siglas en inglés (NDT) se utilizan para examinar la estructura externa e interna de la soldadura para establecer su integridad sin destruir el componente soldado.

2.4.1 Análisis metalográfico

El estudio metalográfico es la disciplina que estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o de una aleación identificando el tipo de microestructura, inclusiones, efectividad de tratamientos térmicos a los que haya sido sometido, micro-rechupes, o en el caso de soldadura, las microestructuras que se obtienen en cada zona de la pieza así como defectos en la misma, etc., esto con el fin de determinar si dicho material cumple con los requisitos para los cuales ha sido utilizado; además, podemos hallar la presencia de material fundido, forjado y laminado. A través de este estudio, se puede conocer la distribución de fases que componen la aleación y las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades [16].

El microscopio es la herramienta más importante del metalurgista ya que, es posible determinar el tamaño de grano, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal. La microestructura revelará el tratamiento

mecánico y térmico del metal y bajo un conjunto de condiciones dadas, se podrá predecir su comportamiento.

2.4.2 Caracterización del material por microscopía electrónica de barrido (MEB)

La microscopía electrónica de barrido (MEB) es una técnica de análisis superficial, que consiste en enfocar sobre una muestra electrodensa (opaca a los electrones) un fino haz de electrones acelerado con energías de excitación desde 0.1 kV hasta 30 kV.

El haz de electrones se desplaza sobre la superficie de la muestra realizando un barrido que obedece a una trayectoria de líneas paralelas. La interacción del haz de electrones con la muestra produce diversas señales (electrones secundarios, electrones retrodispersados, emisión de rayos X, etc.), las cuales son recolectadas por distintos detectores [31]; los cuales permiten obtener información morfológica, topográfica produciendo imágenes de alta resolución (hasta de 3 micras) en muestras orgánicas o inorgánicas [11].

Ventajas del MEB:

- Debido a la gran profundidad de campo, las imágenes que nos muestra el equipo son de apariencia tridimensional, lo cual permite enfocar y observar amplias zonas de la muestra al mismo tiempo.
- Es posible observar muestras con un rango de tamaño de milímetros hasta el orden de micras.
- El uso del microscopio electrónico de barrido es muy variado y se puede utilizar desde investigaciones en la industria petroquímica, metalurgia, materiales (cerámicos, orgánicos) hasta la medicina forense.
- Es una técnica de análisis no destructiva.

Limitaciones del MEB:

- Por las características de funcionamiento de este tipo de equipos, es necesario que la muestra sea conductora o que se le realice una preparación previa para que lo sea y que estén libres de humedad.
- No es posible observar estructuras y detalles ultraestructurales (menores o iguales al orden de nanómetros) de las muestras, para esto se requiere un microscopio de transmisión de electrones TEM por sus siglas en inglés “Transmission Electron Microscopy”.

2.4.3 Ensayo de dureza

El ensayo de dureza permite evaluar la resistencia de un material a la penetración por otro material más duro. Aunque la dureza no es una propiedad fundamental de un material. La aplicación del ensayo de dureza permite evaluar las propiedades de un material, tales como resistencia a ser penetrado, ductilidad y resistencia al desgaste [30].

Por lo general, un ensayo de dureza consiste en penetrar la pieza con un indentador y una carga determinada, sobre la superficie del material a evaluar.

Los ensayos de dureza más comunes son:

- Ensayo de dureza Rockwell (DR) o “HR Rockwell Hardness”

El ensayo de dureza Rockwell utiliza una esfera de acero de diámetro variable según sea el metal a ensayar, por lo general “metales blandos” o un cono de diamante cuando se tratan de metales duros (ver tabla 5.3). La profundidad de la indentación del indentador es medida de manera automática por la máquina de la prueba y se convierte a un número de dureza de Rockwell (DR). Las pruebas de Rockwell proveen un número de dureza que no posee unidades, ya que, es una diferencia de profundidades de indentación[13]. Procedimiento indicado en la norma ASTM E18.

- Ensayo de dureza Brinell (DB)

En el ensayo de dureza Brinell se utiliza una esfera de carburo de tungsteno (regularmente de 10 mm de diámetro) la cual es forzada contra la superficie del material con una carga aplicada según sea el material a analizar. Se mide el diámetro de la impresión en la superficie del material y se calcula el número de dureza Brinell (DB), a partir de la siguiente ecuación [13]:

Ecuación 1.

$$DB = \frac{2F}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - D_i^2}]}$$

Donde F es la carga aplicada en kilogramos fuerza, D es el diámetro del indentador en milímetros y D_i es el diámetro de la impresión en milímetros. La dureza Brinell tiene las unidades de kg/mm^2 [13]. Procedimiento indicado en la norma ASTM E10.

2.4.4 Ensayo de microdureza

El ensayo de microdureza es adecuado para materiales en los que en distintas áreas (zonas o fases específicas del material) puedan obtener diferentes niveles de dureza ya sea por su composición o su microestructura. Es importante mencionar que para que se pueda realizar este ensayo de manera adecuada la superficie del material deberá de ser sometido a una preparación metalográfica hasta llegar al “acabado espejo”.

- Existen dos tipos de ensayos de microdureza:

1. Knoop:

Ensayo que relaciona la carga aplicada con el área de la indentación (huella) marcada. El indentador que se utiliza en este ensayo es una punta de diamante con base rómbica. Sus ángulos entre aristas son $\alpha = 130^\circ$ y $\beta = 172^\circ 30'$ [9].

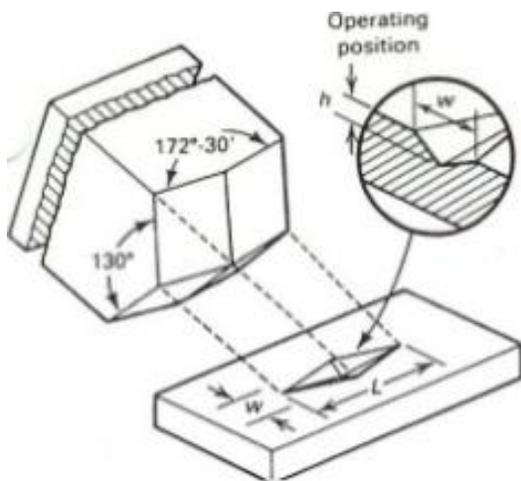


Figura 2.18. *Indentador piramidal Knoop e indentación resultante en la pieza de trabajo [9].*

El valor de microdureza Knoop se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 2. } HK = \frac{P(\text{aplicada})}{A(\text{huella})} = \frac{P}{CL^2}$$

$$HK = \frac{P}{0.07028L^2} = 14.229 \frac{P}{L^2}$$

Donde:

HK= Número de dureza Knoop

P = Carga Aplicada (kgf)

L = Longitud de la diagonal mayor (mm)

C = constante 0.07028

2. Vickers:

El ensayo dureza Vickers relaciona la carga aplicada por el indentador con el área de la impresión de la indentación en el material. Su indentador es una punta de diamante piramidal de base cuadrada con un ángulo de 136° entre las caras opuestas [9].

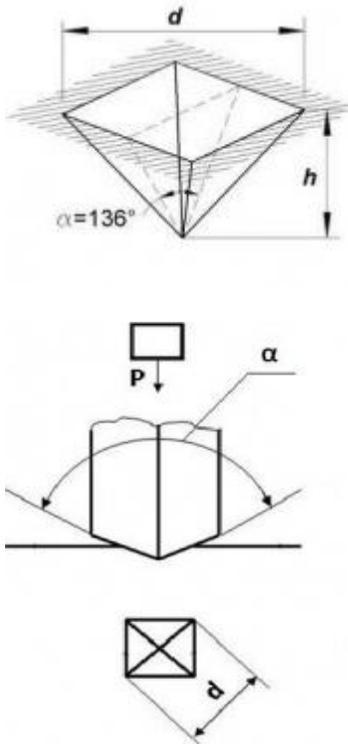


Figura 2.19. *Indentador piramidal Vickers e indentación resultante en la pieza de trabajo [24].*

La forma de calcular el valor de microdureza Vickers.

$$\text{Ecuación 3. } HV = \frac{P(\text{aplicada})}{A(\text{huella})} = \frac{P}{\frac{d^2}{2 \operatorname{sen}(\frac{\alpha}{2})}} = \frac{2 P \operatorname{sen} \alpha/2}{d^2}$$

$$HV = 1.8544 \frac{P}{d^2}$$

Donde:

HV: Número de dureza Vickers

P: Carga aplicada (kgf)

d = Diagonal promedio de la huella (mm)

α = Ángulo entre caras del indentador (136°)

2.4.5 Ensayo de impacto

Los ensayos dinámicos de impacto se realizan generalmente en máquinas denominadas péndulos o martillos pendulares, en las que se determina el comportamiento de los materiales al ser golpeados por una masa conocida que se deja caer desde una altura determinada.

En el ensayo de impacto Charpy, se utiliza el péndulo de Charpy que es un equipo utilizado para determinar la tenacidad de un material. La probeta para realizar la prueba de resistencia al impacto es ensayada en el equipo a flexión en 3 puntos. El péndulo impacta sobre el dorso de la probeta. La diferencia entre la altura inicial del péndulo (h_0) y la final tras el impacto (h_f) permite

medir la energía absorbida en el proceso de fracturar la probeta. En estricto rigor se mide la energía absorbida del área debajo de la curva de esfuerzo vs. deformación, que se conoce como tenacidad [13].

Las probetas que fallan en forma frágil se rompen en dos mitades, sin presentar mayor deformación, en cambio aquellas con mayor ductilidad presentan una alta deformación antes de romperse. Este comportamiento del material depende de su composición química y de la temperatura de ensayo.

La energía absorbida por la probeta (en J), se puede determinar calculando la diferencia de energía del péndulo antes del impacto altura inicial y después de romper la probeta, mediante la altura final a la que llega el péndulo [13] (ecuación 4)

Ecuación 4.

$$E_{abs} = m * g * (h_0 - h_f)$$

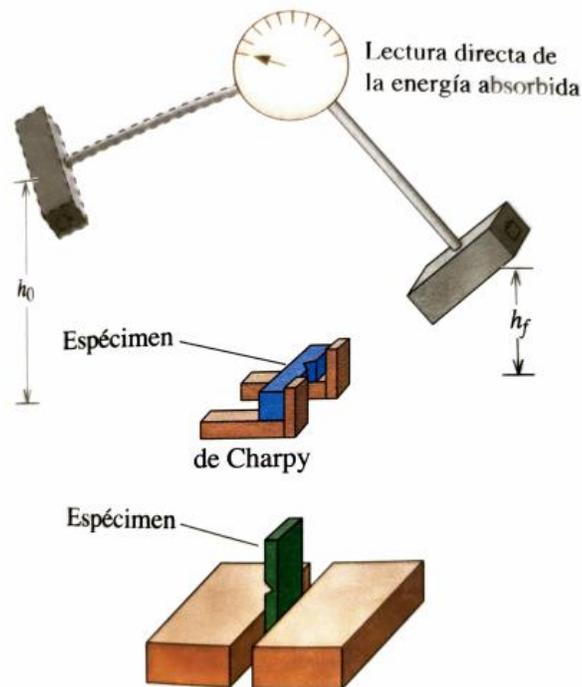


Figura 2.20. Péndulo de Charpy, utilizado para el ensayo de impacto [13].

2.4.6 Ensayo de tracción.

Para seleccionar un material, es necesario conocer sus propiedades de tracción. Estas propiedades frecuentemente son incluidas en las especificaciones del material para reportar su capacidad de carga y asegurar su calidad.

El ensayo de tracción es un ensayo mecánico que tiene como objetivo determinar la resistencia elástica, máxima, última y plasticidad del material cuando se le somete a fuerzas uniaxiales [32]. Para ello se requiere una máquina universal (máquina de ensayos destructivos o prensa hidráulica) mediante la cual se deforma el material en el sentido del eje de la muestra. A medida que se va deformando el material, se va registrando la fuerza “carga” aplicada, hasta alcanzar la carga suficiente para producir la fractura de la muestra.

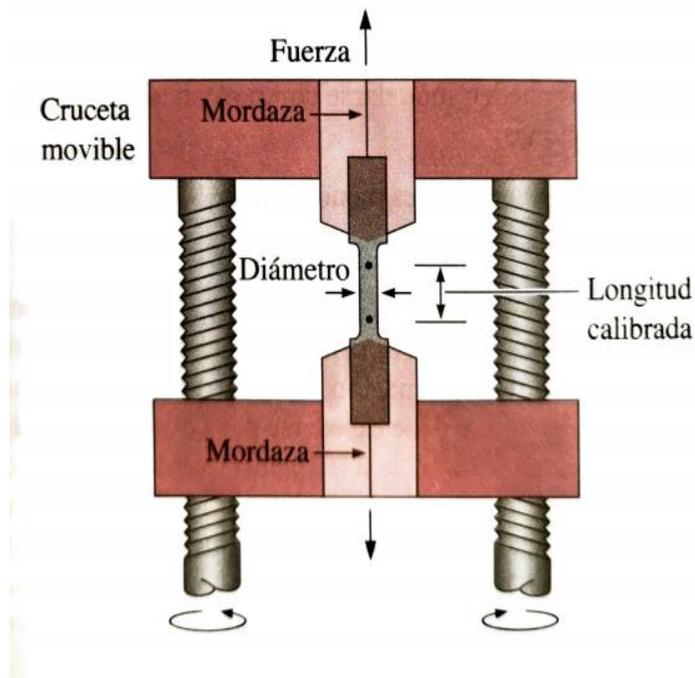


Figura 2.21. Máquina de tracción o prensa hidráulica [13].

La máquina de ensayo produce la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad seleccionable. La celda de carga conectada a la mordaza fija, entrega una señal que representa la carga aplicada, las máquinas están conectadas a un ordenador que registra el desplazamiento y la carga leída [32].

La probeta a ensayar se sujeta por sus extremos al cabezal móvil de la máquina de ensayos y a la célula de carga, respectivamente. Las mordazas deben mantener firme a la muestra, durante el ensayo mientras se aplica la carga, impidiendo el deslizamiento. A su vez, no deben influir en el ensayo introduciendo tensiones que causen la ruptura en los puntos de sujeción. Para que el ensayo se considere válido la ruptura debe ocurrir dentro de la longitud calibrada, en la parte central de la probeta.

2.4.7 Líquidos penetrantes

El ensayo por líquidos penetrantes es un método de ensayo no destructivo que permite determinar discontinuidades superficiales en materiales sólidos no porosos. El procedimiento está limitado a discontinuidades que se encuentren abiertas a la superficie en materiales sólidos no porosos [29].

Se basa en el principio de capilaridad de los líquidos (capacidad de los líquidos para ascender y descender a través de tubos capilares), propiedad que permite su penetración y retención en las aberturas estrechas para la detección de defectos abiertos en la superficie. Se reconoce como el método más sencillo, debido a que entre otras ventajas, es una operación económica, fácil de emplear, no requiere de equipos complejos ni costosos y permite inspeccionar la totalidad de la superficie de la pieza de trabajo sin importar su geometría o tamaño [27]. Facilita la determinación de la longitud de las discontinuidades en la superficie con gran exactitud, pero no su profundidad.

Se emplea en la inspección de materiales metálicos al término de algún proceso de fabricación (fusión, soldadura, tratamiento térmico, etc.) en materiales en los que se va a evaluar la seguridad asociada con su uso (fatiga, corrosión, etc.) [4]. Es uno de los métodos no destructivos más usados para la inspección de soldadura y sus acabados.

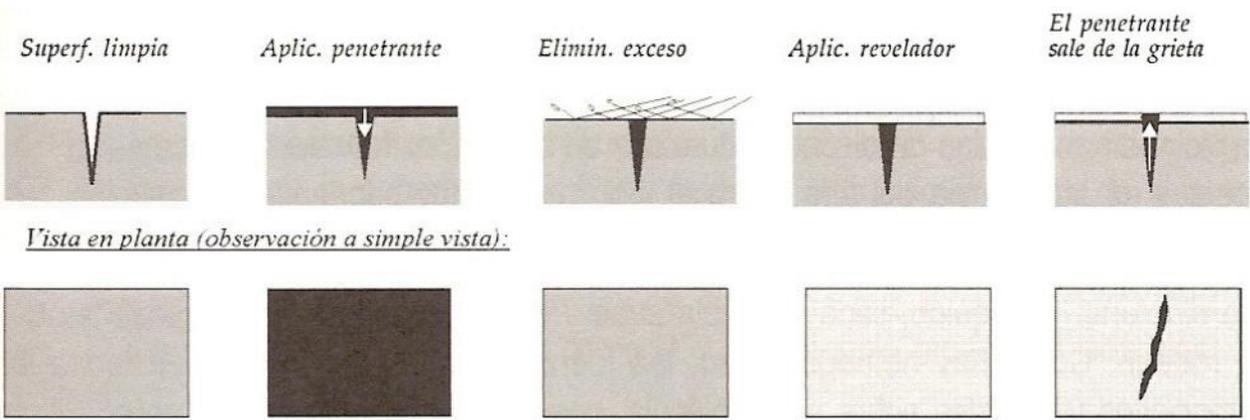


Figura 2.22. Desarrollo experimental de la prueba no destructiva de líquidos penetrantes [29].

Capítulo 3: Objetivos e Hipótesis

3.1 Objetivos generales

- Determinar la influencia de los parámetros en el proceso de soldadura por arco eléctrico usando electrodos revestidos.
- Establecer la metodología adecuada para realizar reparaciones en piezas de aleaciones de aluminio por soldadura SMAW.

3.2 Objetivos particulares

- Generar uniones de aluminio utilizando la soldadura por arco eléctrico con electrodo recubierto.
- Evaluar la calidad de la soldadura por medio de ensayos destructivos y no destructivos.

3.3 Hipótesis

Por medio del conocimiento y control de la influencia de los parámetros del proceso de soldadura SMAW, como son amperaje y temperatura de la pieza a soldar, se obtendrán soldaduras de calidad en este proceso, aun cuando se trabaje en talleres de recursos limitados.

Debido a que no se tiene una metodología establecida, las reparaciones que se llevan a cabo en piezas de aluminio de componentes automotrices, son muy susceptibles a fallar debido a la sensibilidad de las propiedades del metal.

Capítulo 4: Desarrollo experimental del proceso SMAW

En este capítulo se describe el desarrollo experimental del proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido, mediante la realización de 20 uniones en placas de aluminio – silicio donde se modifican dos de los parámetros de dicho proceso, los cuales son: temperatura de precalentamiento de las piezas e intensidad de corriente. Mientras que los parámetros constantes durante todo el proceso de soldadura son: preparación de placa con bisel en V, tiempo de precalentamiento, tipo, posición y técnica de aplicar el electrodo (E4043).

4.1 Material y equipo

Tabla 4.1. *Material y equipo para el proceso de soldadura*

Material	Equipo
Placas de Al-Si obtenidas de una pieza automotriz “monoblock”	Máquina de soldar AGA, modelo: BMS-4-250
Electrodos E 4043	Cables con pinzas caimán
Cepillo de alambre (acero inoxidable)	Careta electrónica
Lamina de acero 1018 precalentada	Mufla para precalentamiento
Cinzel	Guantes de piel
Brocha	Bata de algodón
Martillo	Botas con casquillo

4.2 Proceso de limpieza superficial de las placas

1. Limpieza mecánica mediante:
 - Cepillado con un cepillo de acero inoxidable.
 - Desbastado con lija abrasiva o lima.
2. Limpieza química
 - Desengrasado en frío con alcohol o acetona
 - Lavar con agua y secar para evitar la oxidación.

4.3 Preparación mecánica del material a unir

1. Cepillado del material base.
2. Cortar las placas del material base.
3. Prepara las placas haciendo un bisel en forma de V

4.4 Proceso de soldadura (unión de placas)

1. Conectar el cable a tierra sobre la mesa de trabajo.
2. Seleccionar y ajustar el amperaje según el tipo y diámetro del electrodo.
3. Colocar el electrodo verticalmente en el portaelectrodo.

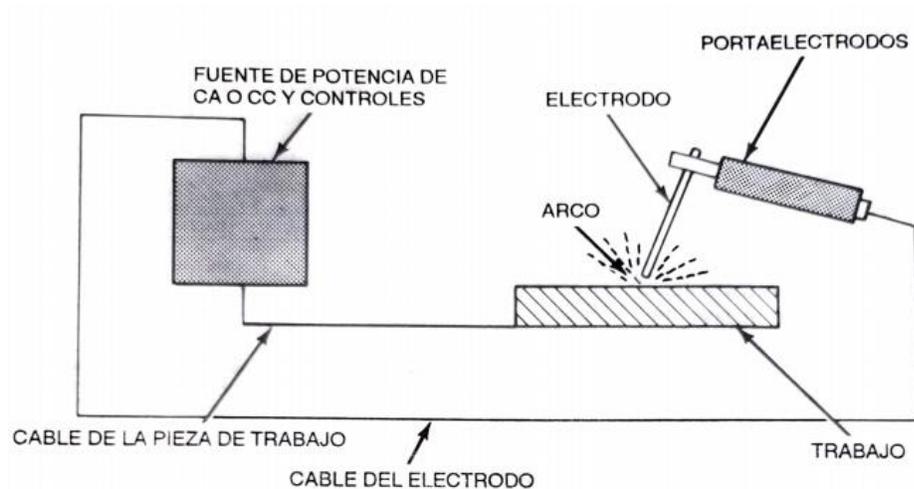


Figura 4.1 Elementos de un circuito de soldadura SMAW [1]

4. Colocar los accesorios que se utilizarán en el proceso sobre la mesa de trabajo (cincel, martillo, brocha).
5. Precalentar una placa de aluminio-silicio (material base) en un horno a una temperatura de 110°C durante un tiempo de 5 minutos para evitar un choque térmico.
6. Calentar una placa de acero 1018 en un horno aproximadamente a 120°C (se utiliza como base para colocar las piezas de Al-Si y mantener la temperatura de precalentamiento al inicio del proceso).
7. Encender la maquinaria de soldar.
8. Ajustar la intensidad de corriente y modificar el amperaje en un rango de (100A – 200A)
9. Fijar la placa de Al-Si precalentada sobre la mesa.

10. Crear el arco eléctrico a partir de un ligero roce ¹, realizando un movimiento muy pequeño de derecha a izquierda entre el electrodo y el metal base.
11. Mantener el arco y desplazar el cordón de soldadura por la técnica de arrastre a lo largo de la placa con una distancia de arco no mayor a 4 mm de altura.
12. Apagar el arco eléctrico, retirando el electrodo de la pieza.
13. Dejar que la soldadura se enfríe por varios minutos.
14. Retirar la escoria (cáscara formada en la superficie) proveniente del recubrimiento del electrodo con ayuda de un cincel.
15. Limpiar la placa del óxido de aluminio con ayuda de un cepillo de acero y una brocha.

¹ Cuando el electrodo se pega a la placa, se mueve rápidamente de derecha a izquierda sobre su eje. Repetir el paso anterior para lograr a mantener el arco eléctrico.

Capítulo 5: Desarrollo experimental de técnicas de evaluación

En este capítulo se presentan las técnicas de evaluación que se utilizan en este proceso de soldadura:

Ensayos mecánicos

Ensayo de dureza, ensayo de microdureza, ensayo de impacto y ensayo de tracción;

Análisis químico por Espectroscopia de energía dispersiva (EDS por sus siglas en inglés) detector químico del MEB (microscopía de barrido electrónico)

Ensayos no destructivos.

Líquidos penetrantes

Preparación metalográfica

Análisis metalográfico

Estas técnicas de evaluación son para determinar la calidad de unión de la soldadura por el proceso SMAW.

5.1 Material y equipo

Tabla 5.1. *Material y equipo para las técnicas de evaluación.*

Material	Equipo	Reactivos
Placas de Al-Si soldadas previamente.	Microscopio estereográfico OLYMPUS SZ - PT	Alúmina, pasta de diamante
Juego de lijas de agua (#240 a #1000)	Microscopio óptico de platina invertida OLYMPUS PMG 3	Keller
Paño Microcloth	Durómetro Macromet 3	Kit líquidos penetrantes
	Máquina universal de tracción y compresión	HF 1% v/v
	Microdurómetro	
	Péndulo Charpy	
	Vernier	

5.2 Preparación metalográfica.

1. Seleccionar y cortar de forma transversal en 2 secciones las placas soldadas previamente, para realizar el análisis metalográfico en cada una de las zonas presentes.
2. Proceso de desbaste
 - 2.1 Esmerilar la corona del cordón de las piezas soldadas.
 - 2.2 Desbastar el área transversal y longitudinal del cordón de soldadura con lija #240 hasta llegar a lija #1000.
3. Proceso de Pulido
 - 3.1 Pulir con alúmina o pasta de diamante en paño MicroCloth las áreas de interés.
 - 3.2 Limpieza ultrasónica a las muestras
4. Revelado Químico
 - 4.1 Realizar el ataque químico (revelado macro-estructura) con reactivo Keller (HF 1% v/v), a la muestra en zonas específicas, en el área del cordón y posteriormente la pieza completa.
5. Estudio Metalografico (microscopio óptico)
 - 5.1 Analizar la macro-estructura, determinar las zonas presentes en la soldadura (cordón de soldadura, zona afectada por calor, material base) utilizando microscopio estereográfico.
 - 5.2 Obtener fotografías en las zonas de interés (afectación por calor, interfase entre el cordón y el material base).
 - 5.3 Análisis microestructural en el cordón de soldadura y la interfase zona afectada - material base a diferentes aumentos y en diferentes zonas, utilizando microscopio óptico de platina invertida.

5.3 Caracterización del material por MEB

1. Preparación metalográfica de las muestras (ver sección 5.2)
2. Colocar la muestra en la platina.
3. Seleccionar la señal a utilizar.
4. Generar vacío en el microscopio.
5. Dirigir el haz de electrones y colocarlo sobre la muestra.
6. Seleccionar la zona de estudio (material base, ZAC, material de aporte).
7. Determinar el análisis cualitativo de los elementos presentes en la muestra.

5.4 Ensayo de dureza

Rockwell H (dureza)

1. Preparar la superficie de la probeta por desbaste y un pulido medio con el fin de dejar completamente derecha y uniforme la superficie como lo requiere el ensayo de dureza.
2. Selección del indentador la carga requerida dependiendo del ensayo (Rockwell H, K, L, M) y el tipo de material de la probeta, usando como referencia la Tabla 5.2.
3. Instalar el indentador con balón de 1/8" diámetro en el durómetro.
4. Seleccionar una carga de 60 Kg.
5. Calibrar el durómetro, utilizando un patrón de dureza secundario.
6. Colocar la probeta metálica en el soporte de muestras del durómetro.
7. Colocar el indentador sobre la superficie de la probeta.
8. Realizar el procedimiento de precarga, carga y encienda la luz verde.
9. Esperar el tiempo programado para el retiro de carga y determinar el número de dureza
10. Leer en la pantalla el valor de dureza en la escala seleccionada.

Tabla 5.2. Aplicaciones típicas de los ensayos de dureza Rockwell [33].

ESCALA	APLICACIONES TÍPICAS
B	Aleaciones de cobre y aluminio, aceros blandos, hierro dúctil, etc.
C	Hierro colado duro, hierro perlítico dúctil, titanio, acero templado, acero duro.
A	Carburos cementados, acero delgado, capas delgadas de acero templado.
D	Acero delgado y templado de capa media, hierro perlítico dúctil.
E	Hierro fundido, aleaciones de aluminio y magnesio.
F	Aleaciones de cobre recocidas, chapas de metal delgadas y blandas.
G	Bronce fosforado, cobre - berilio, hierro dúctil.
H,K,L,M,P,	Metales para cojinetes y otros metales muy blandos.
R,S,V	Aluminio, zinc, plomo.

Tabla 5.3. Ensayos de dureza Rockwell [33].

Durómetro Normal		
Escala	Indentador	Carga, Kg
B	Ø 1/16"	100
C	Cono diamante	150
A	Cono diamante	60
D	Cono diamante	100
E	Ø 1/8"	100
F	Ø 1/16"	60
G	Ø 1/16"	150
H	Ø 1/8"	60
K	Ø 1/8"	150
L	Ø 1/4"	60
M	Ø 1/4"	100
P	Ø 1/4"	150
R	Ø 1/2"	60
S	Ø 1/2"	100
V	Ø 1/2"	150

5.5 Ensayo Vickers (microdureza)

1. Preparar de la superficie (ver sección 5.2)
2. Ataque químico en la probeta con HF 1% v/v.
3. Encender y calibrar el equipo.
4. Seleccionar la carga de ensayo.
5. Colocar la pieza en la zona de interés (soldadura) en la platina.
6. Ajustar la altura entre el indentador y la pieza.
7. Seleccionar con el lente la zona a ensayar.
8. Colocar el indentador sobre la zona seleccionada.
9. Aplicar la carga requerida.
10. Observar la indentación generada por el indentador sobre la pieza.
11. Calibrar a cero las líneas de lectura.
12. Realizar la medición en las longitudes de la indentación.
13. Leer el valor de microdureza o calcular el valor de microdureza con la siguiente ecuación:

$$HV = \frac{P(\text{aplicada})}{A(\text{huella})} = \frac{P}{\frac{d^2}{2 \operatorname{sen}(\frac{\alpha}{2})}} = \frac{2 P \operatorname{sen} \alpha/2}{d^2} \longrightarrow HV = 1.8544 \frac{P}{d^2}$$

5.6 Ensayo de impacto

1. Determinar las dimensiones de la probeta.
2. Hacer una muesca en forma V exactamente a la mitad de la probeta.
3. Ajustar la altura del pendulo
4. Determinar la fricción.
5. Colocar la probeta en el soporte del equipo de impacto (Charpy con muesca “V”) orientada en lado opuesto al péndulo de impacto.
6. Liberar el pendulo de impacto
7. Capturar el valor de energía indicado en el disco graduado
8. Recoger las partes de la probeta
9. Ver al microscopio las fracturas para su análisis.

5.7 Ensayo de tracción

1. Medir y anotar las dimensiones de la probeta.
2. Marcar el centro de la probeta.
3. Colocar y sujetar la pieza (probeta) soldada en las mordazas en la máquina universal.
4. Aplicar la carga a la probeta hasta el punto de fractura.
5. Retirar las partes de la probeta fracturada de las mordazas (sin tocar las fracturas).
6. Determinar visualmente y posteriormente en el microscopio óptico, la zona de fractura.
7. Analizar fractura en microscopio óptico y tomar fotografías.

5.8 Líquidos penetrantes.

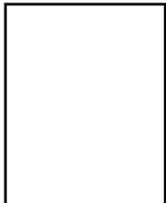
1. Preparar las superficies a inspeccionar
2. Limpieza superficial con solvente.
3. Esperar un tiempo de secado aproximado a 5 minutos.
4. Aplicar el líquido penetrante en el área de inspección.
5. Dejar actuar el líquido penetrante por 10 minutos.
6. Limpieza con un trapo con solvente el excedente del líquido penetrante en la placa.
7. Se deja secar la superficie por 3 minutos.
8. Aplicar una capa de líquido revelador en el área de inspección,
9. Dejar secar la capa del revelador
10. Permitir el tiempo necesario del proceso de revelado de imperfecciones.
11. Toma de fotografías.
12. Medir, contabilizar y clasificar las imperfecciones.
13. Registrar los defectos en la placa.

Capítulo 6: Resultados y análisis de resultados.

A lo largo de este capítulo se muestran los resultados obtenidos del proceso de soldadura SMAW y las técnicas de evaluación utilizadas para este fin. Con base en esto cada prueba realizada se somete a un análisis que servirá para llegar a las conclusiones pertinentes y de esta manera poder determinar la calidad de la soldadura

6.1 Especificaciones del proceso de soldadura SMAW

Tabla 6.1. Especificaciones del proceso de soldadura

Número de placa	1	2	3
Placa			
Área de la placa	10.64 cm ²	9.98 cm ²	8.53 cm ²
Preparación de la placa	Con bisel en V	Con bisel en V	Con bisel en V
Temperatura de precalentamiento	100 °C	110°C	120°C
Tiempo de permanencia (precalentamiento)	5 min	5 min	5 min
Amperaje de trabajo (DC)	185 A	190 A	180 A
Tipo de electrodo	E 4043	E 4043	E 4043
Diámetro del electrodo	1/8''	1/8''	1/8''
Posición del electrodo (crear el arco)	70°	70°	70°

Posición del electrodo (desplazamiento)	85°	85°	85°
Técnica de soldeo	Arrastre	Arrastre	Arrastre
Temperatura final	178°C	160°C	167°C

En la tabla 6.1 se muestran los valores de los parámetros seleccionados para realizar el proceso de soldadura, los parámetros que se modifican durante el proceso de soldadura son, temperatura de precalentamiento con una variación de 10 °C entre cada par de placa a unir, temperaturas de precalentamiento 100°C, 110°C, y 120°C y el otro parámetro que se modifica es la intensidad de corriente (Ampere), En la primera unión se realiza el proceso de soldadura con 185 A, la segunda con 190 A, la tercera con 180 A. manteniendo constante el tipo de corriente.

Los parámetros que se mantienen constantes durante el proceso de soldadura en todas las placas son: preparación de la placa (bisel en V), tiempo de precalentamiento de 5 min, tipo de electrodo (E4043) con diámetro de 1/8'', posición del electrodo al crear el arco eléctrico, así como técnica de arrastre.

6.2 Resultados metalográficos (microscopio óptico)

El proceso de soldadura que se realiza con las siguientes condiciones; 120°C de temperatura de precalentamiento con un tiempo de permanencia de 5 minutos y amperaje de trabajo de 180 A, con estas condiciones de soldadura se obtienen las siguientes microestructuras.



Figura 6.1. *Microestructura del material base (corte longitudinal).*

La figura 6.1 (corte longitudinal) muestra una microestructura aluminio–silicio eutéctico interdendrítico, disuelto en una solución sólida semi homogénea, en el recuadro rojo es posible observar dendritas en la etapa de crecimiento y la presencia de agujas de Silicio.

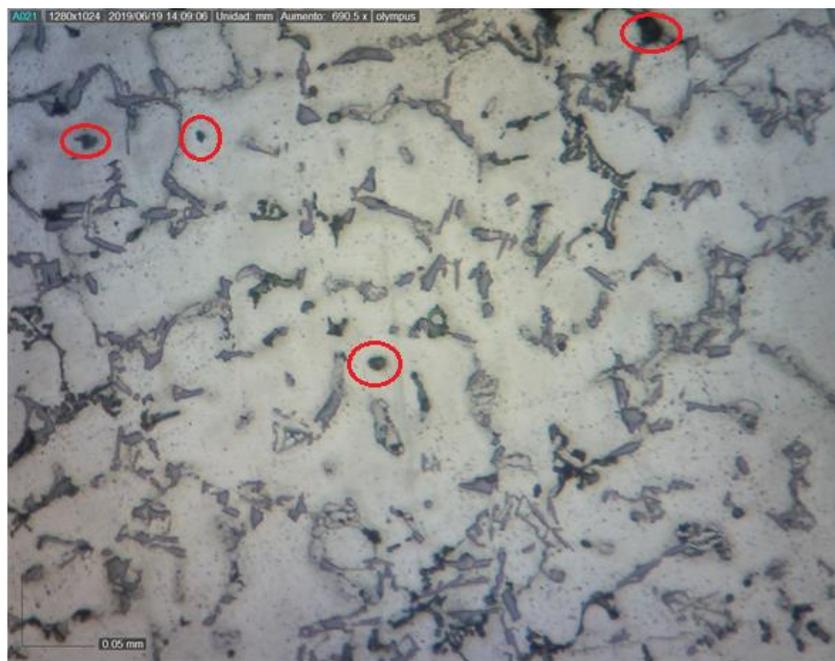


Figura 6.2. *Microestructura del material base (corte transversal).*

En la figura 6.2 (corte transversal de la placa) se observa una matriz aluminio-silicio en una solución sólida con mayor presencia de dendritas en nucleación y crecimiento, los círculos en la microestructura indican presencia de escoria, óxidos y/o intermetálicos como Al_2Cu por su morfología circular

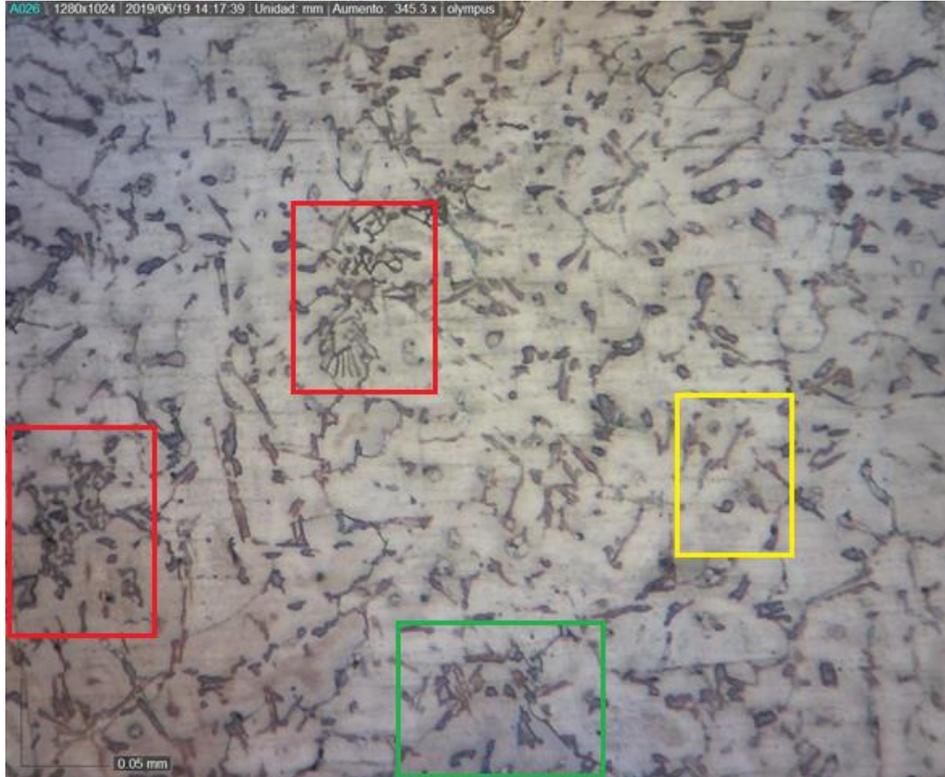


Figura 6.3. *Microestructura del material base en la zona ZAC (Zona Afectada por el Calor)*

La figura 6.3 muestra la microestructura de la zona afectada por el calor (ZAC por sus siglas) en la cual se observa una matriz de aluminio-silicio, el silicio en forma aguja. También es posible observar la presencia de dendritas en diferentes etapas, en el recuadro amarillo se encuentran algunas dendritas en la etapa de nucleación, en el recuadro verde se muestran dendritas en crecimiento y por último en los recuadros rojos ya se tienen dendritas completamente formadas con ramificaciones delgadas, debido a su morfología también se conocen como script chino.



Figura 6.4. *Microestructura del material entre las zonas de material de aporte – línea de fusión –zona ZAC - material de base*

La figura 6.4 muestra diferentes microestructuras cada una correspondiente a las zonas presentes, en el óvalo verde se encuentra la zona del material base, su microestructura es una matriz de Al-Si, con presencia de algunas ramas delgadas de las dendritas que crecen en la zona ZAC (zona indicada con el óvalo rojo), en esta zona también se observan dendritas en la etapa de nucleación y crecimiento. La siguiente fase de superior a inferior es la zona de línea de fusión, la cual está indicada con óvalos de color amarillo en donde se observa la formación y el crecimiento de granos, así como la presencia de un poro en el óvalo superior izquierdo. En la parte de en medio de la línea de fusión (indicada con círculo azul) se observa una dendrita de gran tamaño que parte en dos zonas la línea de fusión. Por último, tenemos la zona del material de aporte señalada con un óvalo de color azul claro, con un grano más pequeño que en la línea de fusión, así como algunas zonas con segregaciones, las cuales podrían ser intermetálicos de aluminio-cobre, aluminio-cobre-hierro o escoria del proceso de soldadura.



Figura 6.5. *Microestructura del material de aporte (corte longitudinal)*

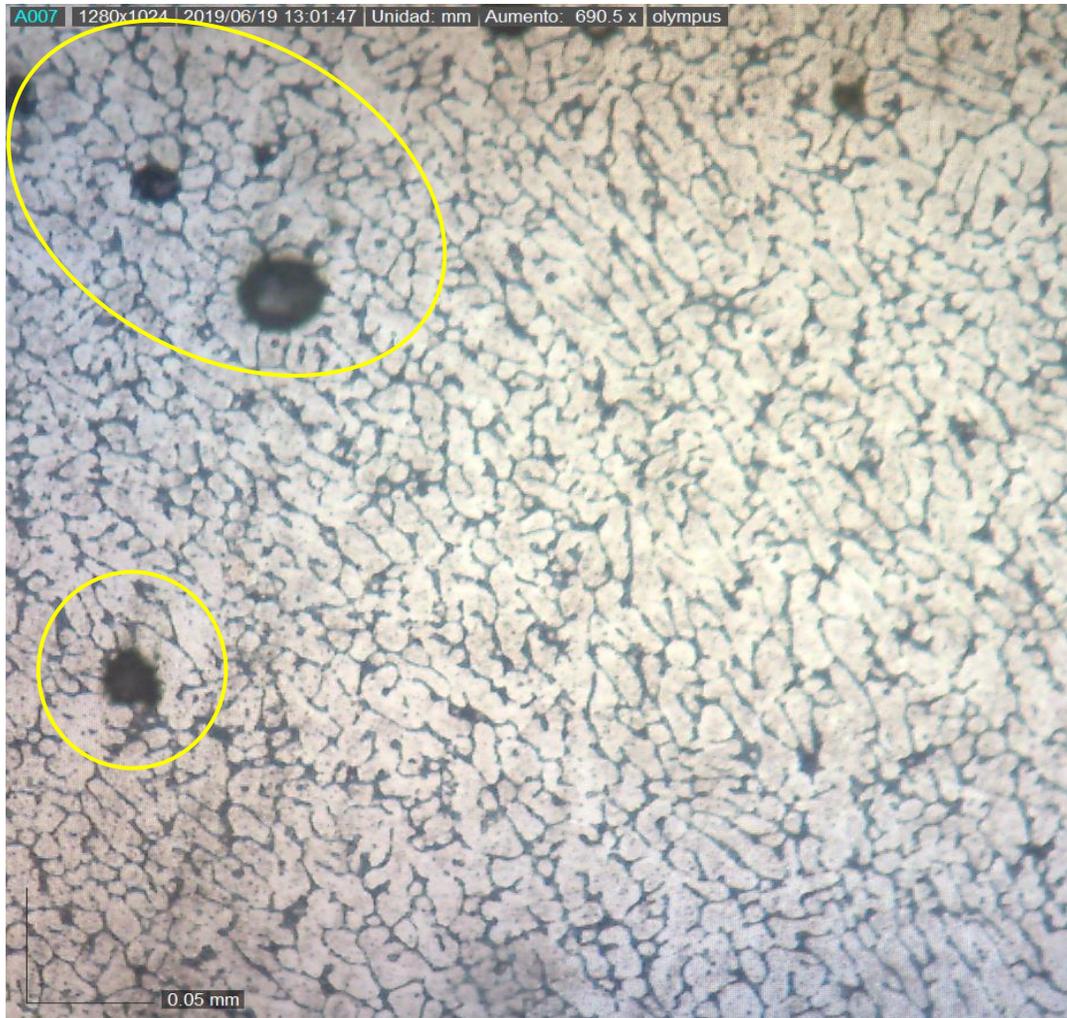


Figura 6.6. *Microestructura del material de aporte con presencia de porosidad (corte transversal).*

Las figuras 6.5 y 6.6 muestran las microestructuras del material de aporte, después de la solidificación, por el proceso de soldadura. La figura 6.5 hace referencia a un corte longitudinal de esta zona, en donde se puede observar una microestructura de aluminio–silicio interdendrítica en una solución sólida homogénea, los granos en esta microestructura son de forma equiaxial. La figura 6.6 muestra la microestructura del corte transversal en la zona del material de aporte, se observa una microestructura interdendrítica con granos equiaxiales en un 85% y un 15% columnares.

6.3 Caracterización química del metal por MEB

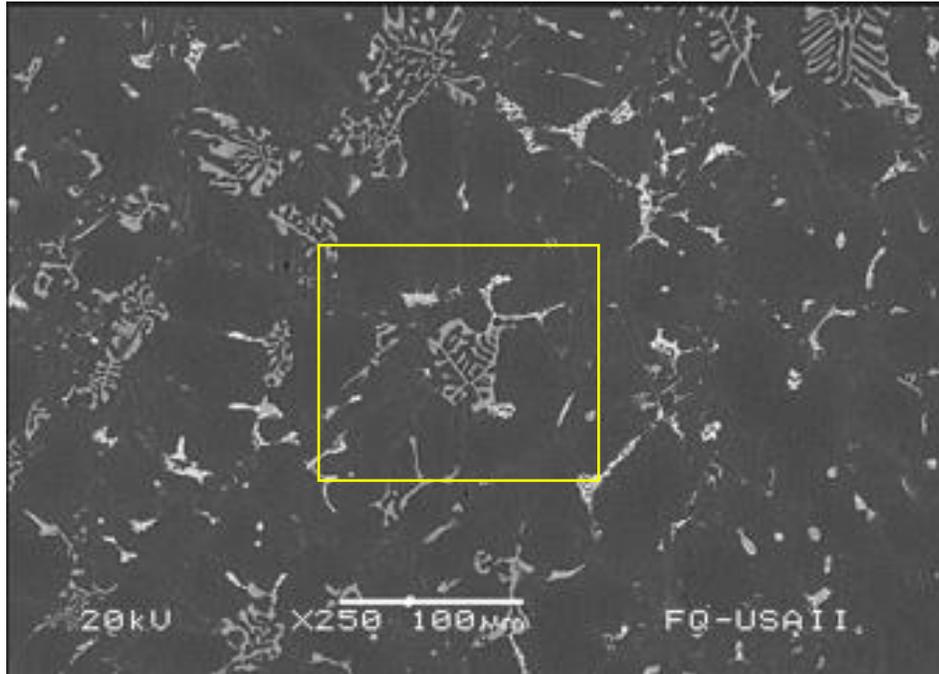


Figura 6.7. *Microestructura base Al-Si obtenida en MEB*

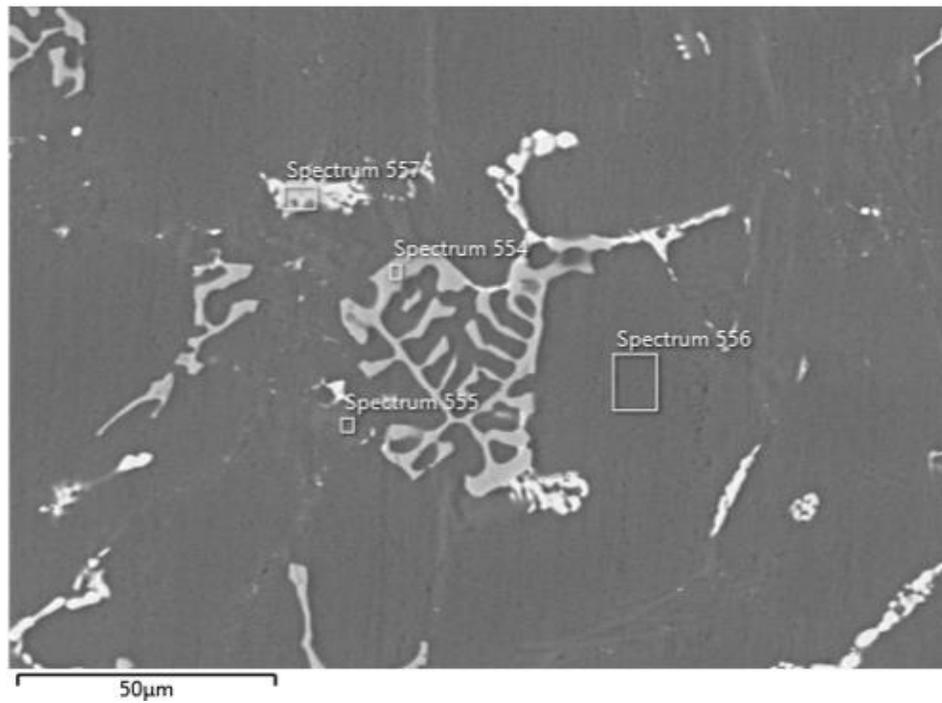


Figura 6.8. *Microestructura dendrítica del material base Al-Si obtenida en MEB*

En los estudios de caracterización microestructural y química del metal por MEB se obtienen fotografías de la microestructura del material en zonas específicas (material de aporte, ZAC, material base). La figura 6.7 muestra la microestructura en la zona del material base, en donde se puede apreciar una matriz de aluminio-silicio con presencia de dendritas formadas a partir de compuestos intermetálicos aluminio con hierro, manganeso y cobre de acuerdo con su morfología, las cuales están distribuidas en toda la solución sólida de aluminio-silicio. La figura 6.8 muestra la microestructura de una dendrita presente en la figura 6.7 (señalada en recuadro) esta dendrita presenta características de una velocidad de solidificación lenta de acuerdo con su forma y ramificación.

En la figura 6.8 se indican 4 puntos específicos de análisis los cuales corresponden a los siguientes microanálisis químicos del material base Al-Si o también llamados espectros químicos.

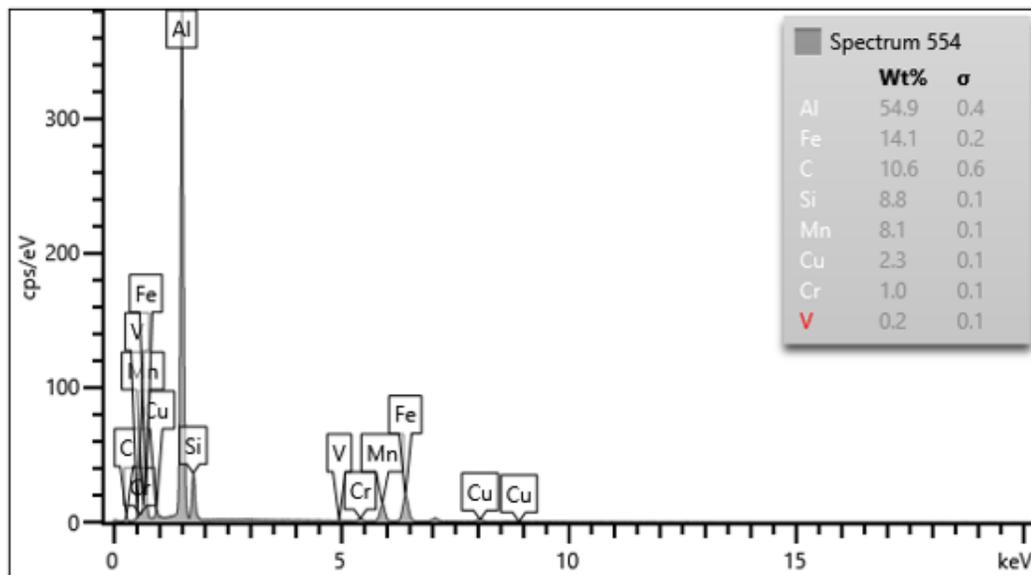


Gráfico 6.1. Microanálisis químico del material base Al-Si en el punto 554, obtenido por EDS.

El gráfico 6.1 presenta el microanálisis químico en el punto 554 obtenido mediante EDS, el cual corresponde a una parte de la dendrita (rama) observada en la figura 6.8, en el gráfico se pueden observar los puntos correspondientes a cada elemento con referencia a su composición química, así como una tabla que muestra una composición porcentual para cada elemento, el elemento con mayor presencia es el Al 54.9%, posterior a este sigue el Fe 14.1%, Si 8.8% y Mn 8.1%, Cu 2.3%, el resto está compuesto por otros elementos. Lo que indica que de acuerdo a la

composición química y a la morfología que presenta la dendrita también conocida como script chino, se puede tratar del intermetálico $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$.

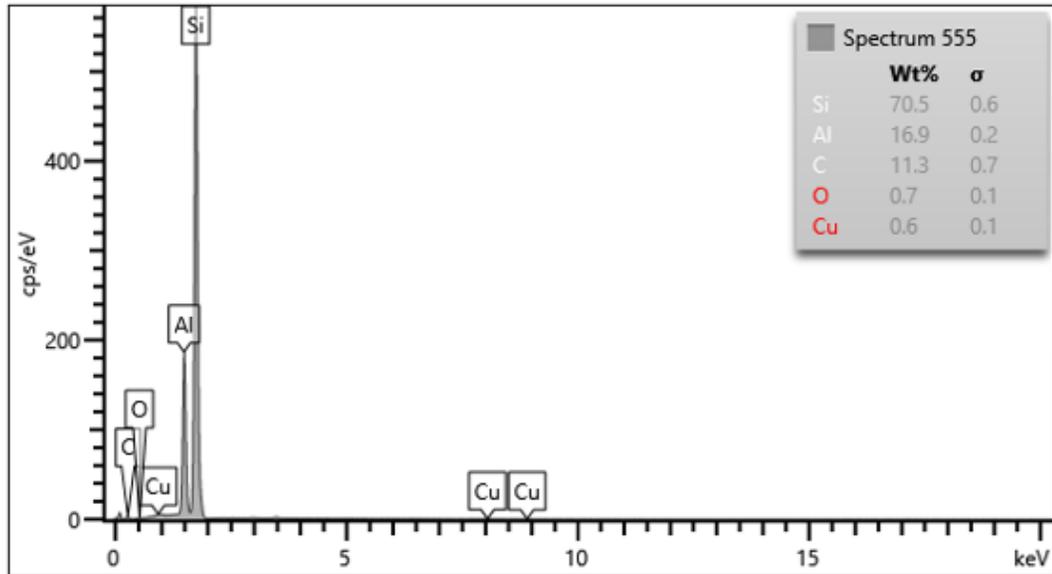


Gráfico 6.2. Microanálisis químico del material base Al-Si en el punto 555, obtenido por EDS.

El gráfico 6.2 representa el microanálisis químico en el punto 555 del material base Al-Si, tal punto se encuentra en el material base cerca de la dendrita, los elementos presentes son el Si en mayor presencia 70.5% y el Al 16.9% ambos elementos son representativos de nuestro material base, también hay presencia de C 11.3% el cual puede provenir del proceso de soldadura. Esta composición puede hacer referencia a la presencia de alguna aguja de Silicio.

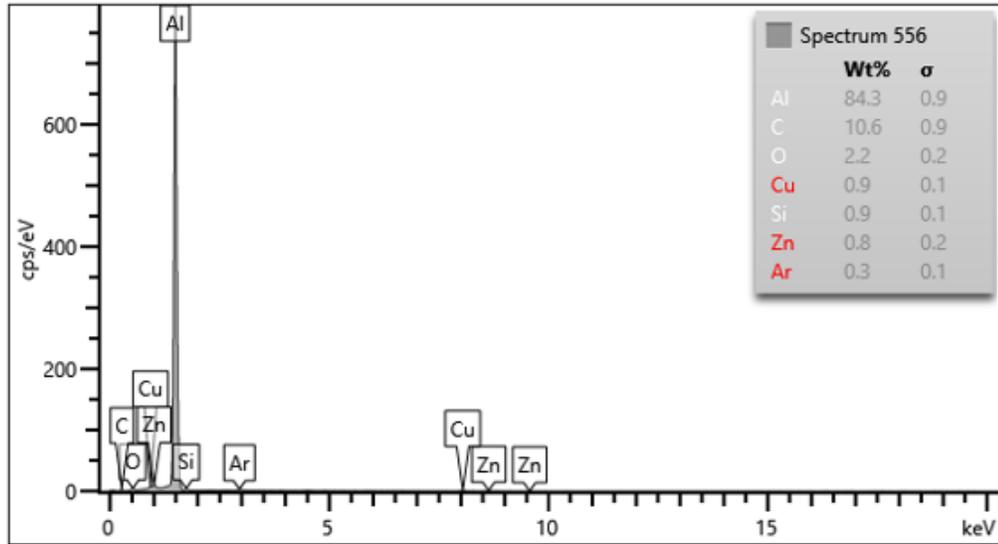


Gráfico 6.3. Microanálisis químico del material base Al-Si en el punto 556, obtenido por EDS.

El gráfico 6.3 muestra el microanálisis químico en el punto 556 obtenido por EDS, el cual se encuentra en el material base lejos de la dendrita como se puede observar en la Figura 6.8, el espectro químico en este punto indica que el elemento con mayor presencia es el Al 84.3% y un 0.9% de Si, entre otros elementos provenientes del proceso de soldadura.

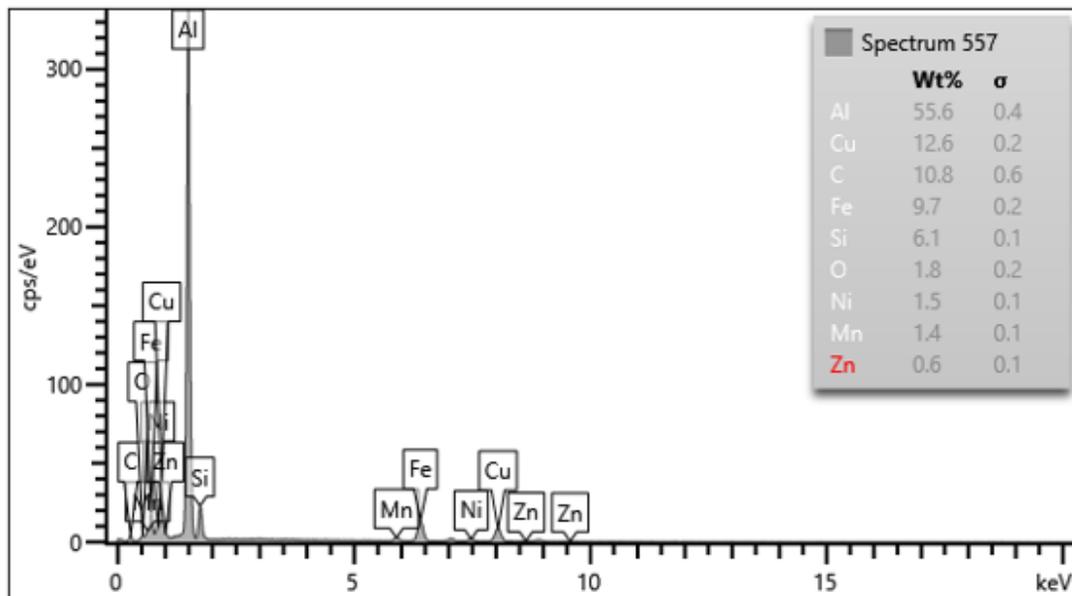


Gráfico 6.4. Microanálisis químico del material base Al-Si en el punto 557, obtenido por EDS.

En el gráfico 6.4 se observa el microanálisis químico correspondiente al punto 557 presente en la figura 6.8, ubicado en una dendrita en crecimiento o compuesto intermetálico (Al_2Cu) ya que la composición química es del 55.6% de Al (elemento con mayor presencia), 12.6% de Cu, 9.7% de Fe, 6.1% de Si, entre otros elementos con menor porcentajes o elementos procedentes del proceso de soldadura.

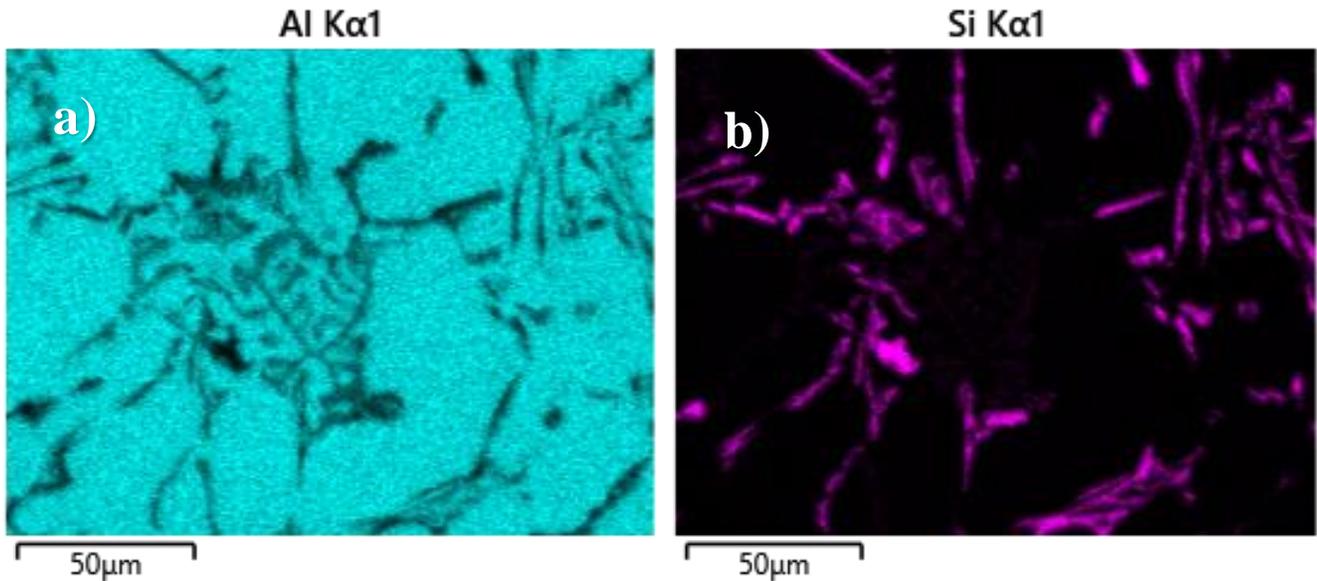


Figura 6.9.1 Mapeo en la zona del material base Al-Si en EDS, a) Elemento aluminio (Al), b) Elemento silicio (Si)

La técnica de mapeo se realizó sobre la figura 6.8, la cual representa una microestructura dendrítica del material base Al-Si obtenida en microscopio electrónico de barrido (MEB). En la figura 6.9.1 en este mapeo se identifica la presencia del elemento a analizar en toda la microestructura, para el: a) aluminio (Al), se muestra en color azul la presencia cualitativa que tiene el aluminio en esta zona, mientras que el inciso b) presencia de silicio (Si), se indica con color morado en donde hay presencia en la misma zona.

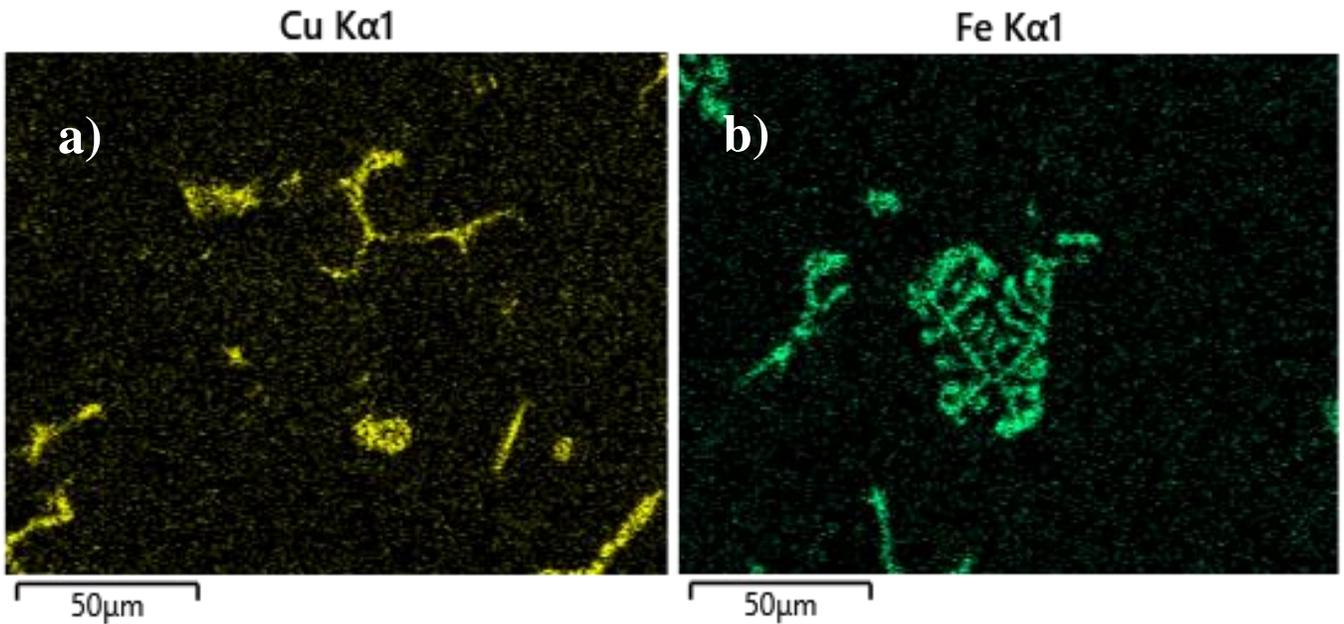


Figura 6.9.2 Mapeo en la zona del material base Al-Si en EDS, a) Elemento cobre (Cu), b) Elemento hierro (Fe)

En la figura 6.9.2 se identifican la presencia de los siguientes elementos a) cobre (Cu), b) hierro (Fe). En el inciso “a)” que refiere al elemento cobre el cual se muestra en color amarillo en zonas específicas donde se concentra este elemento, estas zonas se encuentran junto a la dendrita lo que podría indicar que se trata de intermetálicos de aluminio–cobre. Para el inciso “b)” que muestra la proporción cualitativa de hierro en color verde, se puede observar que la presencia de este elemento se encuentra principalmente sobre la dendrita, lo que afirma que se trata del intermetálico $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$.

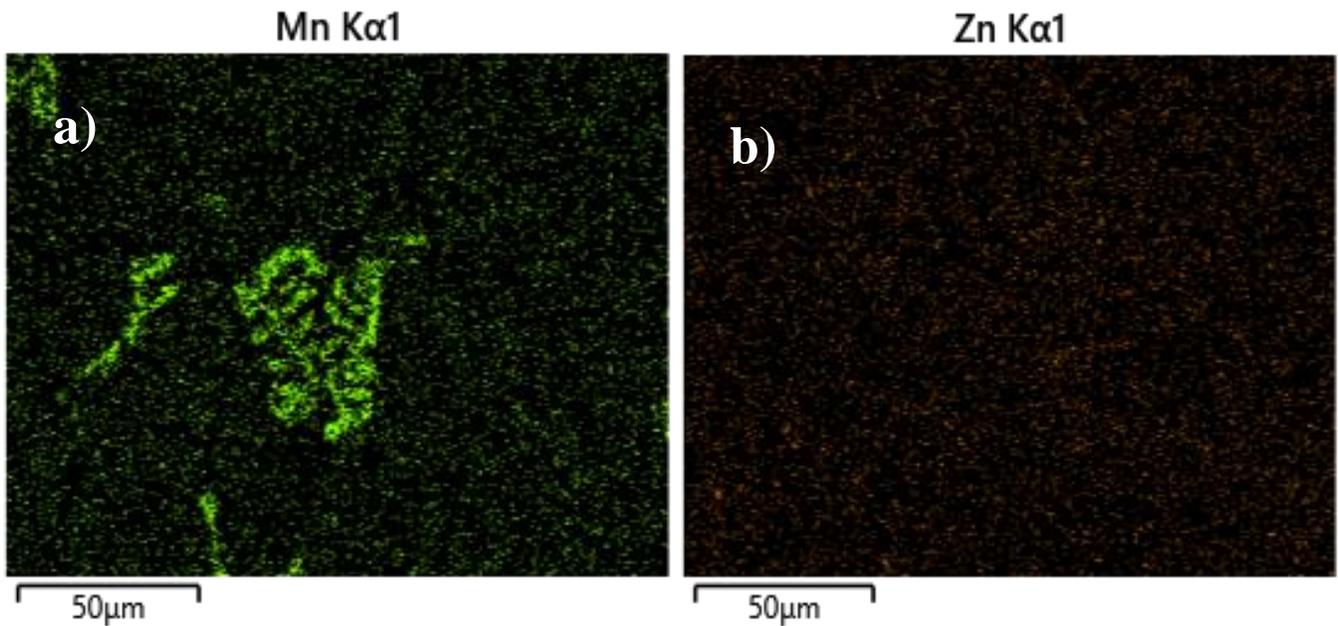


Figura 6.9.3. Mapeo en la zona del material base Al-Si en EDS, a) Elemento manganeso (Mn), b) Elemento zinc (Zn)

En la figura 6.9.3 se observa la presencia de los elementos a) manganeso (Mn), b) zinc (Zn). El inciso “a)” muestra una representación cualitativa del manganeso sobre la figura 6.8, en color verde se puede observar que la concentración puntual del Mn pertenece al intermetálico $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$, también se encuentra disuelto homogéneamente sobre el material base, mientras que el inciso “b)” que representa la presencia de zinc, se puede observar que el Zn se encuentra distribuido homogéneamente sobre la zona de mapeo.

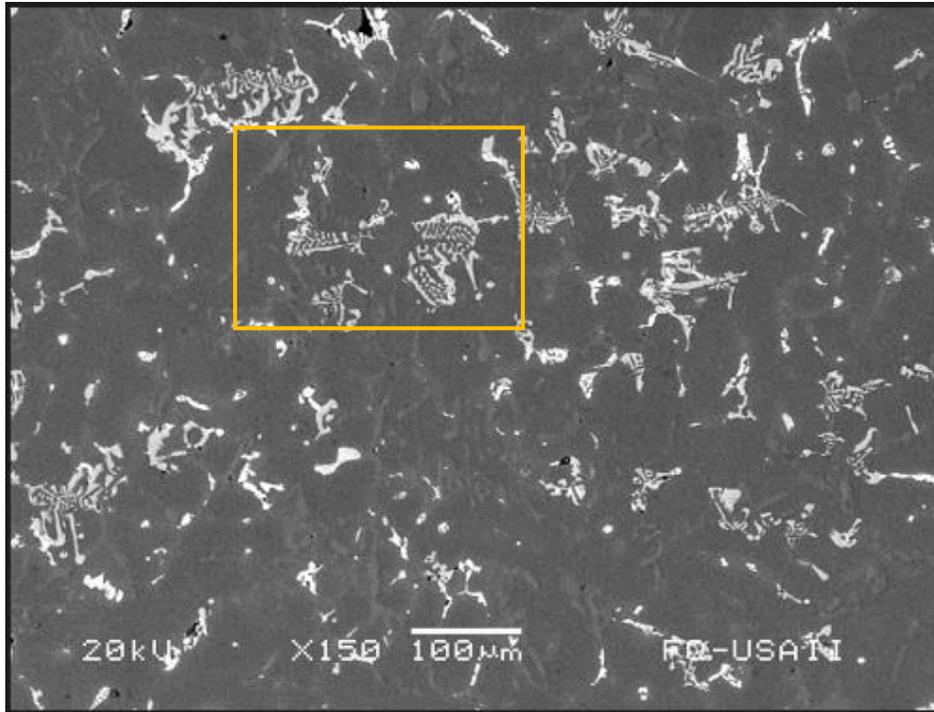


Figura 6.10. *Microestructura de la zona de soldadura (material de aporte), obtenida en MEB*

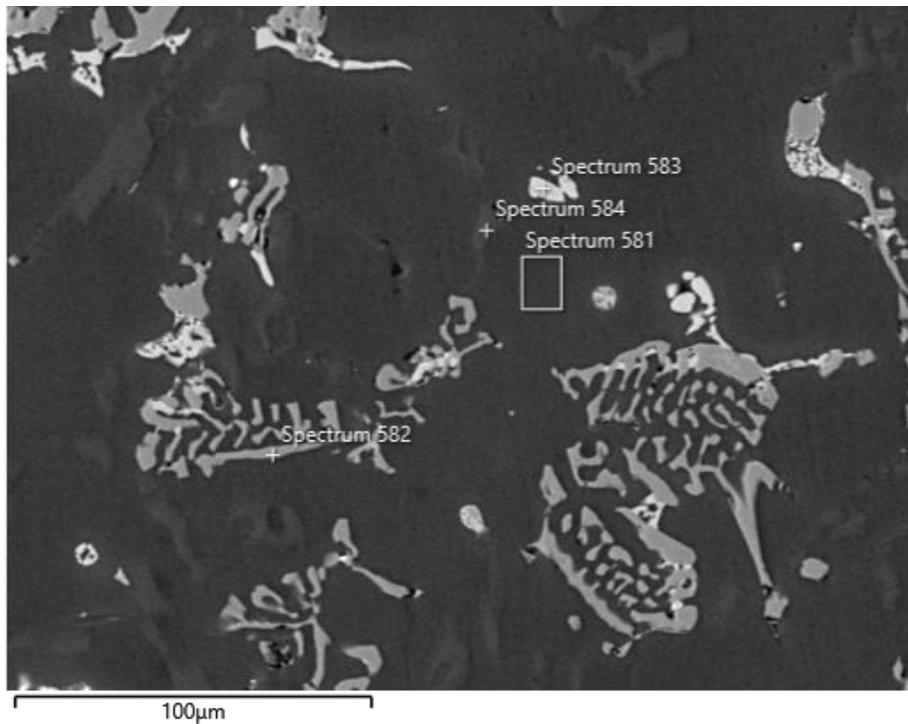


Figura 6.11. *Microestructura de la zona de soldadura con los puntos de espectros señalados (material de aporte), obtenida en MEB*

Realizando la prueba de caracterización química del metal por MEB se observan las siguientes microestructuras. La figura 6.10 muestra la microestructura en la zona de soldadura (material base), en donde se aprecia una matriz de aluminio-silicio con presencia de dendritas formadas a partir de compuestos intermetálicos de hierro, cobre y manganeso, las cuales están distribuidas no homogéneamente en toda la solución sólida de aluminio-silicio. La figura 6.11 hace referencia o muestra con mayor escala, la microestructura de dos dendritas presentes en la figura 6.10 (señalada en recuadro) donde es posible observar que tales dendritas presentan características de forma y estructura similar a las dendritas formadas con una velocidad de solidificación lenta. La figura 6.11 señala 4 puntos específicos dentro de la solución sólida de análisis, los cuales corresponden a los siguientes microanálisis químicos del material base Al-Si o también llamados espectros químicos.

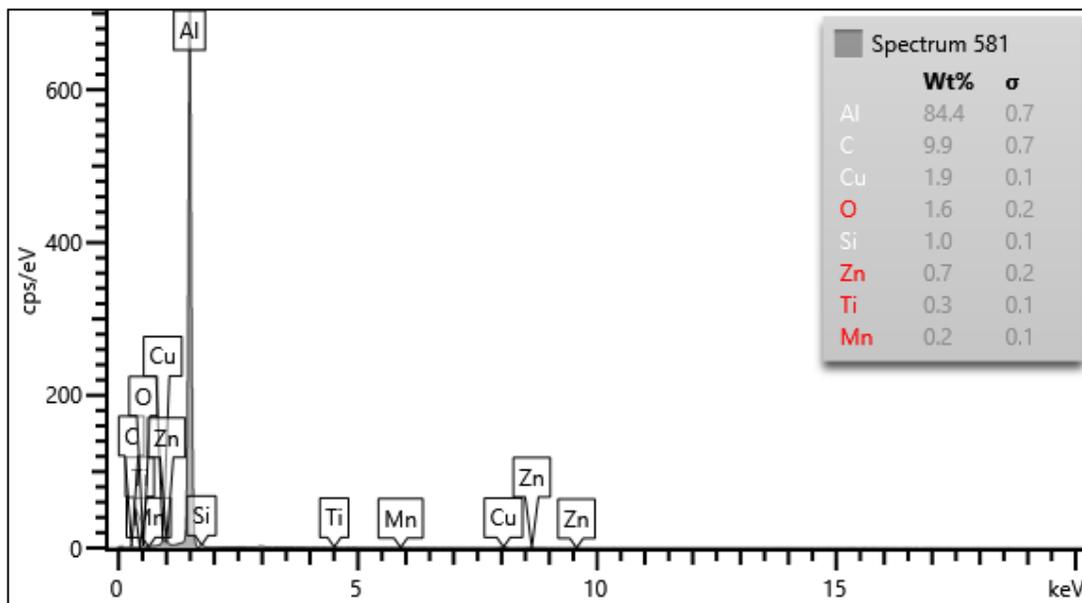


Gráfico 6.5. Microanálisis químico del material de aporte en el punto 581, obtenido por EDS.

El gráfico 6.5 representa el microanálisis químico del material de aporte en el punto 581 así como una tabla de composición porcentual de cada uno de los elementos presentes, el punto 581 se encuentra en una zona de material de aporte homogénea (sin presencia de ninguna dendrita), en donde el elemento con mayor presencia es el Al 84.4%, seguido del Cu 1.9% y por último el Si 1.0%.

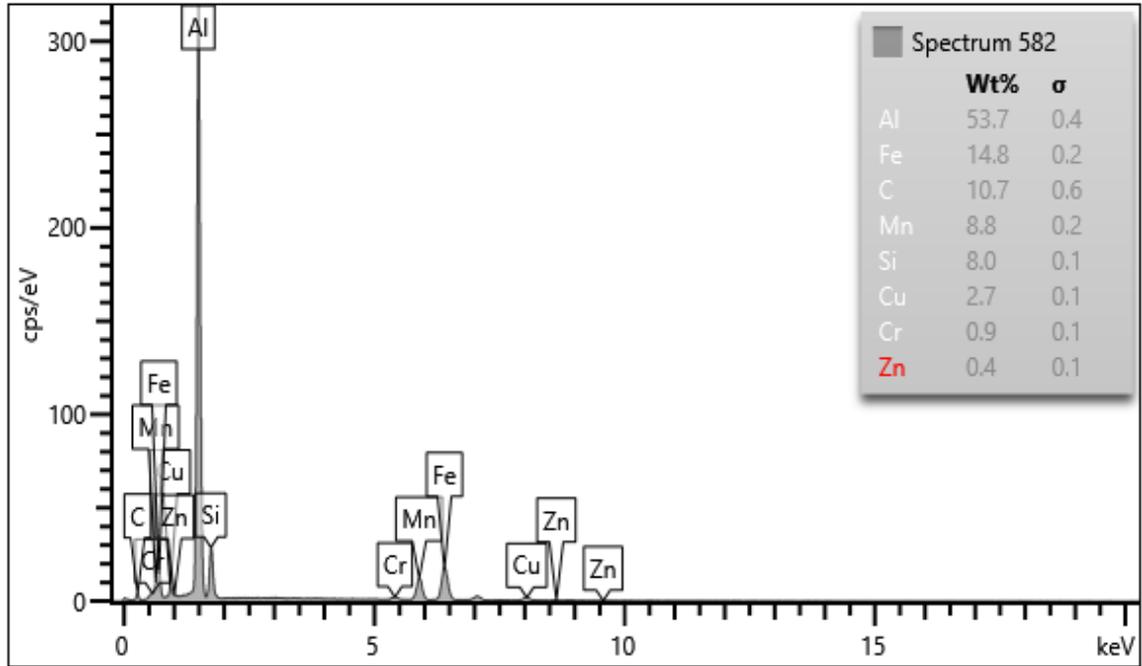


Gráfico 6.6. Microanálisis químico del material de aporte en el punto 582, obtenido por EDS.

El gráfico 6.6 indica el microanálisis químico del punto 582 ubicado sobre una ramificación de una dendrita que se observa del lado izquierdo de la figura 6.11, el microanálisis químico en este punto muestra que el elemento con mayor presencia es Al 53.7%, de ahí sigue el Fe 14.8%, Mn 8.8%, Si 8%, Cu 2.7%, entre otros elementos provenientes del proceso. De acuerdo con la composición química obtenida y a la morfología de la microestructura, el punto 582 se encuentra ubicado en el intermetálico $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$.

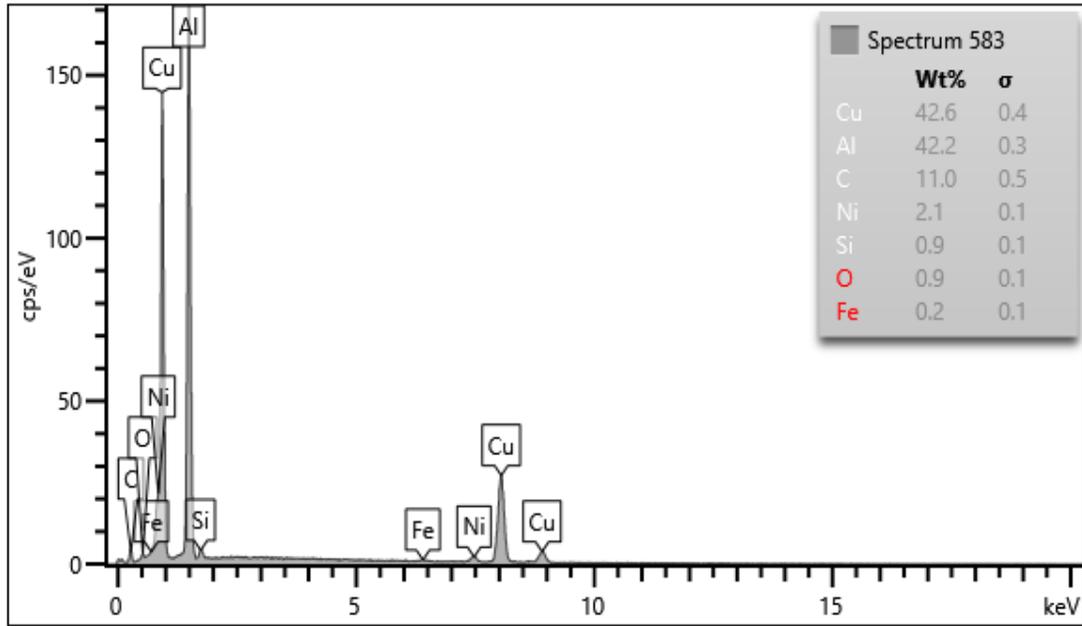


Gráfico 6.7. Microanálisis químico del material de aporte en el punto 583, obtenido por EDS.

El gráfico 6.7 representa el microanálisis químico correspondiente al punto 583 el cual se encuentra ubicado en una dendrita en nucleación la cual se puede observar de lado derecho superior en la figura 6.11. Este gráfico también muestra una tabla correspondiente a la composición química porcentual en el punto 583, la cual indica que el elemento con mayor porcentaje es el Cu 42.6%, también hay presencia de Al 42.2%, Ni 2.1%, Si 0.9%, entre otros elementos. Esta composición indica que existe la presencia de un intermetálico de cobre (Al_2Cu).

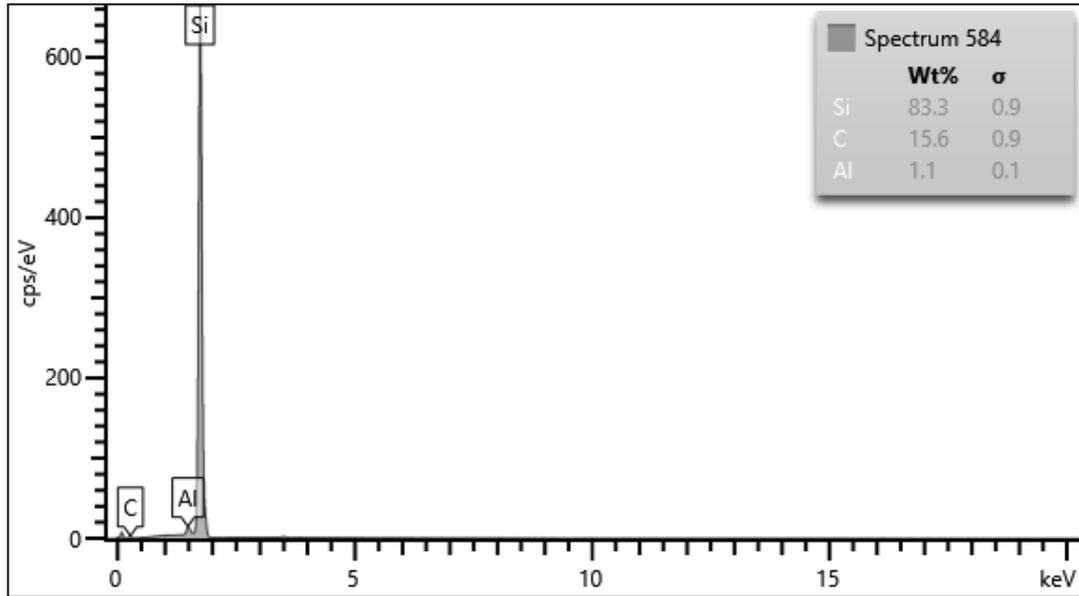


Gráfico 6.8. Microanálisis químico del material de aporte en el punto 584, obtenido por EDS.

El gráfico 6.8 representa el microanálisis químico correspondiente al punto 584 el cual se encuentra sobre un precipitado de la microestructura (aguja de silicio) y muy cercano a algunas dendritas en nucleación y crecimiento. El elemento con mayor presencia es el Si 83.3%, C 15.6% y Al 1.1%.

El segundo estudio de mapeo que se realizó fue sobre la figura 6.11, la cual representa una microestructura dendrítica en la zona de la soldadura (material aporte) obtenida en microscopio electrónico de barrido (MEB).

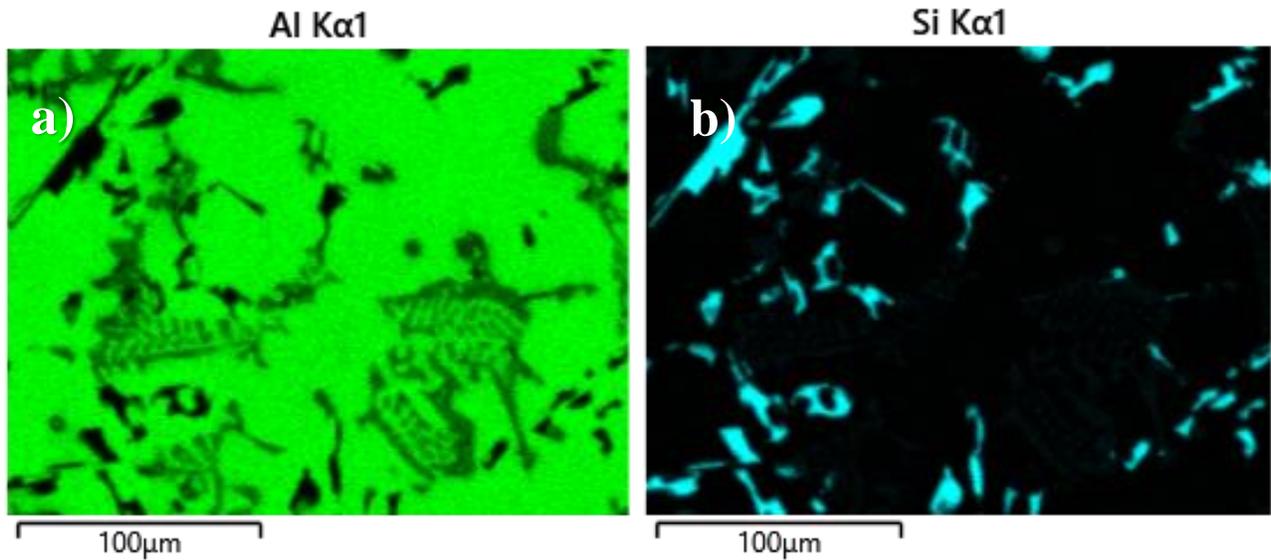


Figura 6.12.1 Mapeo en la zona del material de aporte en EDS, a) Elemento aluminio (Al), b) Elemento silicio (Si)

En la figura 6.12.1 el mapeo identifica la presencia de dos elementos en toda la microestructura, para el inciso a) presencia de aluminio (Al) se representa de manera cualitativa de color verde, el inciso b) presencia de silicio (Si) se muestra en color azul en la misma zona que el aluminio, lo que indica que estos dos elementos se encuentran en grandes cantidades en solución sólida, como lo indican los espectros de composición química.

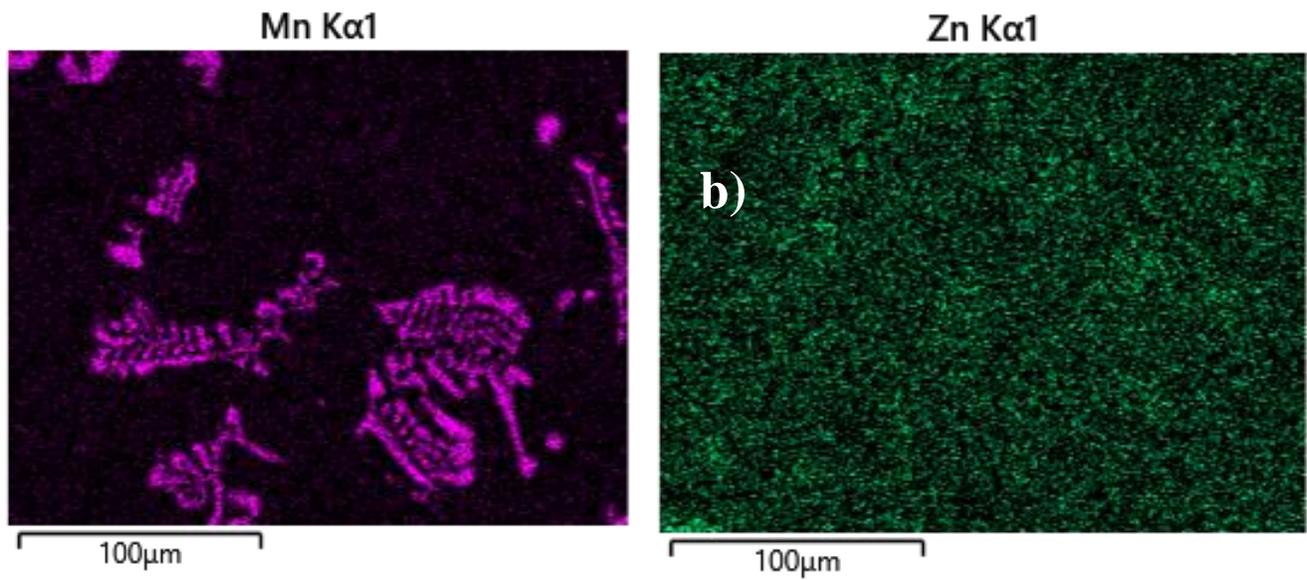


Figura 6.12.2 Mapeo en la zona del material de aporte en EDS, a) Elemento manganeso (Mn), b) Elemento zinc (Zn)

La figura 6.12.2 identifica la presencia de los elementos a) manganeso (Mn) el cual se encuentra indicado de manera cualitativa en color morado sobre las microestructuras dendríticas, las cuales nos indican que son microestructuras de intermetálicos de Mn, b) zinc (Zn), este elemento se presenta en color verde, el cual está disuelto en toda la aleación de manera homogénea

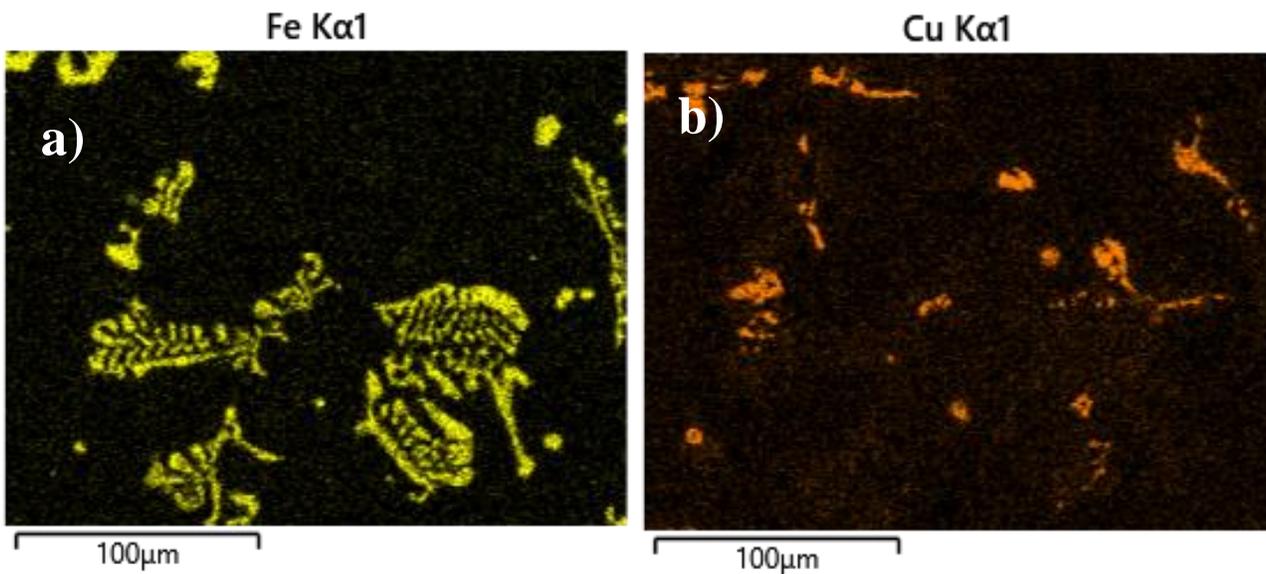


Figura 6.12.3. Mapeo en la zona del material de aporte en EDS, a) Elemento hierro (Fe), b) Elemento cobre (Cu).

En la figura 6.12.3 se observa la presencia de los elementos correspondientes a los incisos a) hierro (Fe), el cual representa en color amarillo la presencia de hierro, en donde se puede observar que este elemento se concentra en la misma zona que el Mn (ver figura 6.12.2 inciso a) confirmando de esta manera que la microestructura dendrítica es del intermetálico $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$. Tanto que el inciso b) indica de manera cualitativa de color naranja la presencia de Cobre (Cu) sobre la misma zona.

En función de la composición química determinada por los espectros y la técnica de mapeo se pueden identificar las microestructuras que se forman durante el proceso de soldadura, así como los compuestos intermetálicos que se formaron con Fe, Cu y Mn.

6.4 Ensayo Rockwell H (dureza)

Tabla 6.2. Valores experimentales del ensayo de dureza en escala Rockwell H de la placa 1 con temperatura de precalentamiento de 100°C y amperaje de 185A

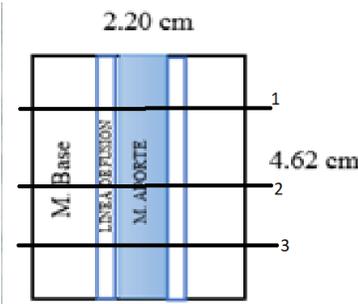
Número de Placa	Placa	Materia base	Interfase	Línea de fusión	Cordón de soldadura
1		102.7 HRH	102.9 HRH	99.4 HRH	91.7 HRH
		101.5 HRH	102.8 HRH	98.9 HRH	92.2 HRH
		102.6 HRH	103.9 HRH	100.6 HRH	92.8 HRH



Gráfico 6.9. Barrido de las durezas en escala HRH en las diferentes zonas de estudio en la placa 1 con temperatura de precalentamiento de 100°C y amperaje de 185A.

En este ensayo se realizan las mediciones de dureza en 3 placas diferentes, la tabla 6.2 corresponde a los datos de durezas de la placa 1, la cual está dividida en 3 niveles diferentes a lo largo de las piezas, marcadas con las líneas 1,2 y3 en las siguientes zonas material base, interfase, línea de fusión y material de aporte, el gráfico 6.9 presenta un barrido de dureza general de la pieza, en este gráfico se observa que la zona con menor dureza es el material de aporte y la zona con mayor dureza es la de interfase, teniendo una diferencia promedio de 11 unidades HRH. Mientras que la zona del material de base presenta una dureza muy similar a la zona de interfase con una diferencia de 0.2 unidades de HRH y la zona con una dureza intermedia entre la zona con mayor y menor dureza es la zona de línea de fusión.

Tabla 6.3. Valores experimentales del ensayo de dureza en escala Rockwell H de la placa 2 con temperatura de precalentamiento de 110°C y amperaje de 190A.

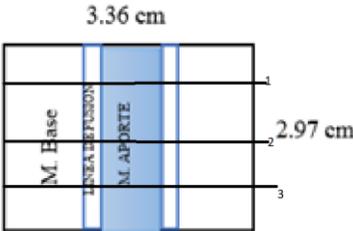
Número de Placa	Placa	Materia base	Interfase	Línea de fusión	Cordón de soldadura
2		101.6 HRH	102.5 HRH	99.9 HRH	92.6 HRH
		100.9 HRH	102.6 HRH	99.2 HRH	92.1 HRH
		103.1 HRH	103.7 HRH	100.1 HRH	93.2 HRH



Gráfico 6.10. Barrido de las durezas en escala HRH en las diferentes zonas de estudio en la placa 2 con temperatura de precalentamiento de 110°C y amperaje de 190A.

La tabla 6.3 muestra los datos de dureza HRH de la placa 2 con dimensiones de 3.36 cm de ancho y 2.97 cm de altura. Los datos están clasificados por las diferentes zonas de estudio en el material (material base, interfase, línea de fusión y material de aporte), basándonos en el gráfico 6.10, el cual representa un barrido de las durezas HRH de manera horizontal en toda la placa, se observa que las zonas con mayores durezas y similares entre ellas son la interfase con 103.9 HRH y el material base 101.8, así como la zona con menor dureza es del material de aporte con 92.6 HRH.

Tabla 6.4. Valores experimentalmente del ensayo de dureza en escala Rockwell H de la placa 3 con temperatura de precalentamiento de 120°C y amperaje de 180A.

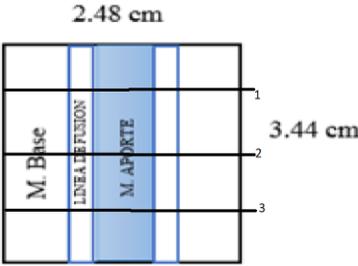
Número de Placa	Placa	Materia base	Interfase	Línea de fusión	Cordón de soldadura
3		104 HRH	103.9 HRH	102.2 HRH	91.8 HRH
		104.2 HRH	103.1 HRH	99.9 HRH	92.3 HRH
		104.1 HRH	103.7 HRH	99.8 HRH	92.6 HRH



Gráfico 6.11. Barrido de las durezas en escala HRH en las diferentes zonas de estudio en la placa 3 con temperatura de precalentamiento de 120°C y amperaje de 180A.

En la tabla 6.4 se encuentran los resultados correspondientes a la placa número 3 con condiciones en el proceso de soldadura de 120°C de temperatura de precalentamiento y 180 A. Las dimensiones de esta placa son de 2.48 cm de ancho y 3.44 cm de alto. Las mediciones de dureza se realizaron en las 4 zonas de la pieza (material base, interfase, línea de fusión y material de aporte), con ayuda del gráfico 6.11, el cual representa el valor de las durezas en cada una de las zonas y de manera general en toda la pieza, se puede observar que la zona con mayor dureza es la del material

base, seguida de la zona de interfase y la que presenta menor dureza es la correspondiente al material de aporte, teniendo una diferencia de 11.9 HRH entre la zona del material base (mayor dureza) y la zona del material de aporte (menor dureza).

6.5 Ensayo Vickers (microdureza)

Tabla 6.5. Valores experimentales en el ensayo de microdureza Vickers para la placa 1 con temperatura de precalentamiento de 100°C y amperaje de 185A.

Número de Placa	Placa	Materia base	Interfase	Línea de fusión	Cordón de soldadura
1		76.3	66.9	68.2	79.0
		75.9	66.8	69.0	78.7
		76.7	67.2	68.7	79.3



Gráfico 6.12. Barrido de las microdurezas en las diferentes zonas de estudio en la placa 1 temperatura de precalentamiento de 100°C y amperaje de 185A.

El ensayo de microdureza se obtienen mediciones en 3 placas distintas, en la placa 1 condiciones en el proceso de soldadura 100°C temperatura de precalentamiento y amperaje 185 A,

los valores obtenidos se muestran en la tabla 6.5, las cuales se ubican a cada una de las zonas de la pieza, en el gráfico 6.12 se puede observar que la zona con mayor valor del ensayo de microdureza corresponde al material de aporte con 79 Vickers y la zona con menor valor corresponde a la interfase con 67 Vickers por lo que hay una diferencia entre esas zonas de 12 Vickers. Con respecto a las otras 2 zonas restantes la zona del material base tiene un valor de microdureza muy similar a la zona de aporte, mientras que la zona de línea de fusión es similar a la interfase.

Tabla 6.6. Valores experimentales del ensayo de microdureza para la placa 2 con temperatura de precalentamiento de 110°C y amperaje de 190A.

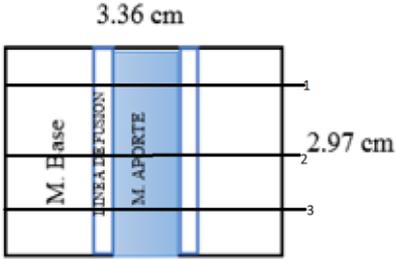
Número de Placa	Placa	Materia base	Interfase	Línea de fusión	Cordón de soldadura
2		77.9	61.6	62.1	80.9
		77.6	61.0	61.8	81.1
		78.3	61.2	62.5	80.6



Gráfico 6.13. Barrido de las microdurezas en las diferentes zonas de estudio en la placa 2 con temperatura de precalentamiento de 110°C y amperaje de 190 A.

Para la placa 2 del ensayo de microdureza con dimensiones de 3.36 cm de ancho y 2.97 cm de altura, se obtienen los valores reportados en la tabla 6.6, los cuales están divididos en las 4 zonas presentes en la placa, el gráfico 6.13 representa un barrido general y específico por zona, en el podemos observar que la zona con mayor valor de microdureza es la zona del material de aporte teniendo 80.6 Vickers, mientras que las zonas de menor valor corresponden a la interfase y línea de fusión con 61 Vickers. Por lo tanto, se tiene una diferencia entre la zona con mayor y menor valor de microdureza de 19.6 Vickers.

Tabla 6.7. Valores experimentales en el ensayo de microdureza para la placa 3 con temperatura de precalentamiento de 120°C y amperaje de 180A.

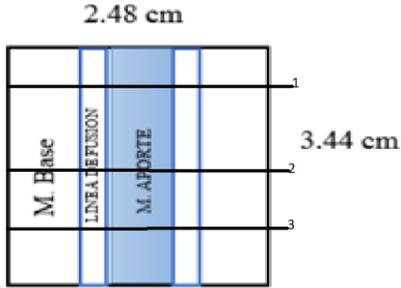
Número de Placa	Placa	Materia base	Interfase	Línea de fusión	Cordón de soldadura
3		76.5	60.3	61.9	82.6
		76.0	59.5	61.1	81.7
		77.1	59.9	61.5	80.9



Gráfico 6.14. Barrido de las microdurezas en las diferentes zonas de estudio en la placa 3 con temperatura de precalentamiento de 120°C y amperaje de 180A.

Por último, para la placa 3 se obtienen los siguientes valores (ver tabla 6.7) los cuales se encuentra ubicados verticalmente en las distintas zonas presentes en la placa y horizontalmente a las diferentes alturas a las cuales se determinan estas mediciones, con ayuda del gráfico 6.14 que muestra la representación de un barrido general y por zonas en toda la placa, se puede observar que la zona con mayor valor de microdureza es la del material de aporte con 81.7 Vickers y la zona con menor valor es la zona de interfase con 59.9 Vickers, por lo que entre ambas hay una diferencia de 21.8 Vickers. La diferencia que existe entre ambas zonas puede ser justificada por las microestructuras presentes en ellas.

6.6 Ensayo de impacto.

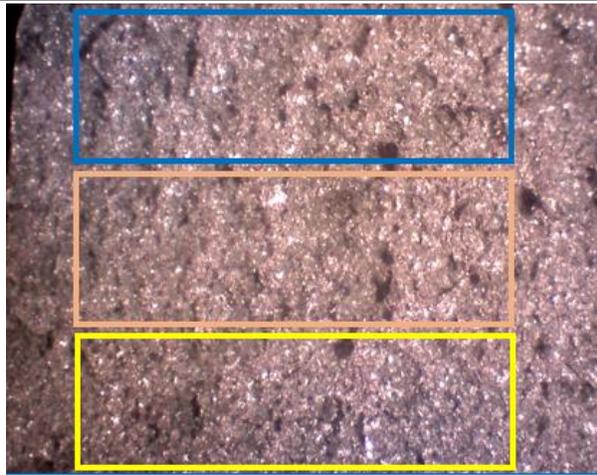


Figura 6.13. Fractura de la sección 1 de la probeta del ensayo de impacto.

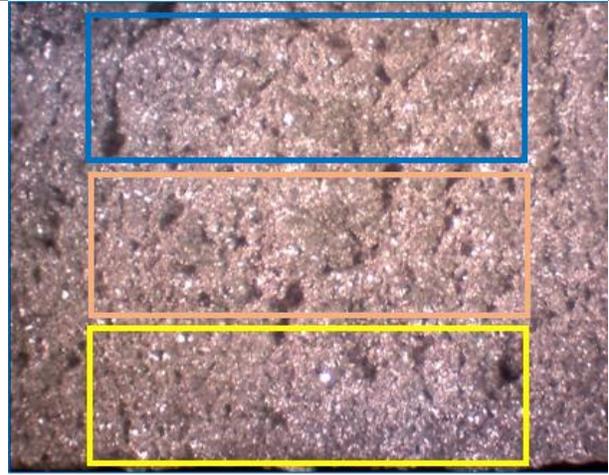


Figura 6.14. Fractura de la sección 2 de la probeta del ensayo de impacto.

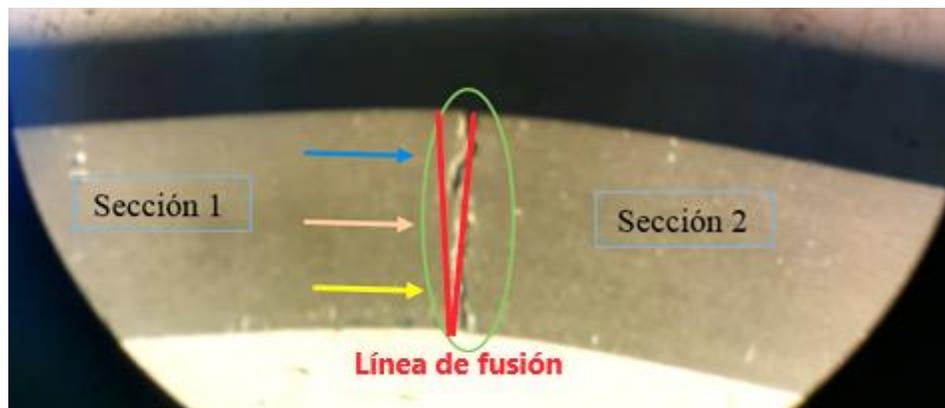


Figura 6.15. Fotografía de la probeta fracturada por el ensayo de impacto.

En la prueba de impacto se utiliza una probeta sin ranura, la cual se divide en dos secciones, la figura 6.13 muestra la sección 1 y la figura 6.14 la sección 2. Ambas secciones se dividen en 3 zonas para facilitar el análisis de dicha fractura. La zona 1 está identificada por un recuadro azul, la zona 2 por un recuadro naranja y la zona 3 con recuadro amarillo.

En la figura 6.13 zona 1 se observa una fractura 10% frágil – 90% dúctil de acuerdo con la deformación que se observa en la superficie (el menor grado de deformación se presenta en el área central), de lado derecho inferior hay presencia de poros causados por el gas atrapado durante el proceso de soldadura, en la figura 6.14 zona 2 se observa una fractura 5% frágil – 95% dúctil con superficie rugosa en casi toda la totalidad del área y de lado izquierdo la presencia de dos poros.

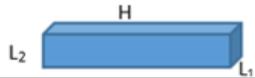
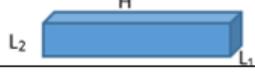
En la zona 2 de la sección 1 se observa una fractura 15% frágil – 85% dúctil, la deformación plástica en la superficie es mayor de la zona centro hacia el lado izquierdo mientras que hacia el lado derecho hay presencia de porosidad. En la sección 2 de la misma zona se observa una fractura 10% frágil – 90% dúctil con una deformación plástica y concentración mayor en poros en toda el área, todos creados durante el proceso de soldadura por el gas atrapado.

Por último, para la zona 3 en la sección 1 se observa fractura 30% frágil–70% dúctil con presencia de 1 poro central y relieves producidos por la deformación plástica en toda la zona de la fractura. Para la sección 2 en la zona 3 se observa una fractura 35 % frágil – 65% dúctil, donde las zonas que presentan mayor deformación plástica son los laterales (lado izquierdo y derecho), teniendo presencia de poros del lado derecho.

La figura 6.15 muestra la unión de las dos secciones en la parte de la fractura, al ensamblar las secciones se observa que la zona 1 hay un espacio de 0.4 mm, en la zona 2 existe un espacio 0.2 mm y por último la zona 3 ensambla perfectamente. En toda la probeta la fractura fue continua, entre la zona 1 y la 2 se observan algunos puntos de deformación plástica y la fractura tiene varias direcciones mientras que en la zona 3 se observa una fractura lineal y hay menor deformación plástica.

6.7 Ensayo de tracción

Tabla 6.8. Dimensiones de las probetas para el ensayo de tracción .

Número de probeta	Probeta	Dimensiones (L ₁ , L ₂ ,H)	Volumen (V=L ₁ *L ₂ *H)	Amperaje de trabajo	Temperatura de precalentamiento
1		L ₁ : 0.54 cm L ₂ : 0.52 cm H: 7.65 cm	2.15 cm ³	180 A	120 °C
2		L ₁ : 0.60 cm L ₂ : 0.61 cm H: 7.68 cm	2.81 cm ³	190 A	110°C

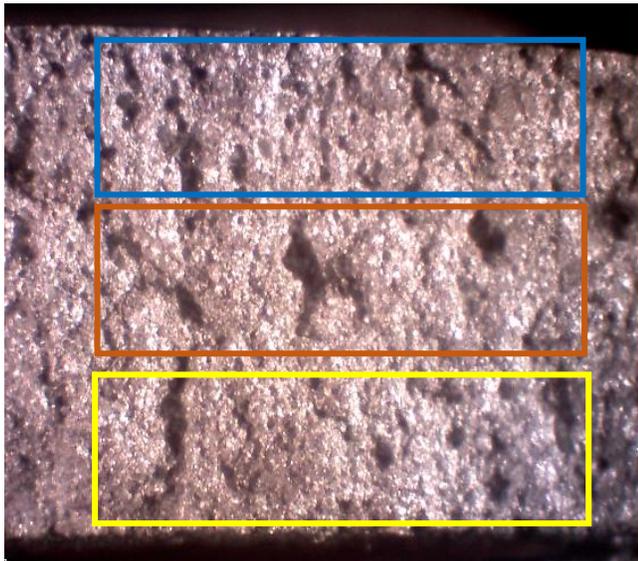


Figura 6.16. Fractura de la sección 1 de la probeta sin defecto utilizada en el ensayo de tracción.

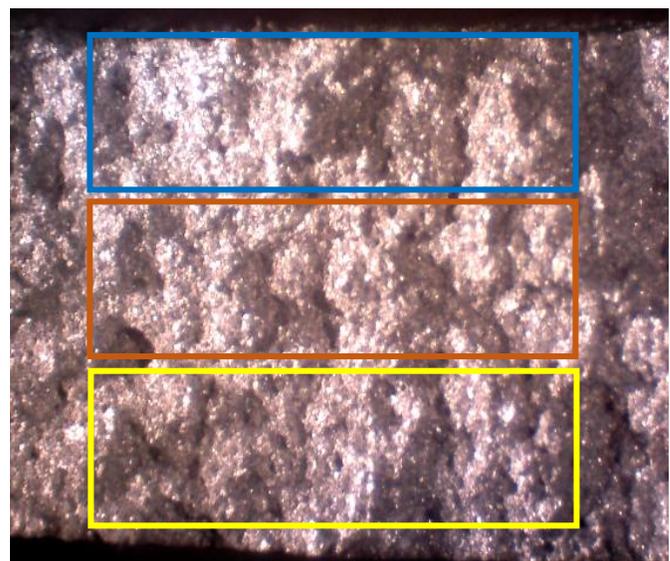


Figura 6.17. Fractura de la sección 2 de la probeta sin defecto utilizada en el ensayo de tracción.

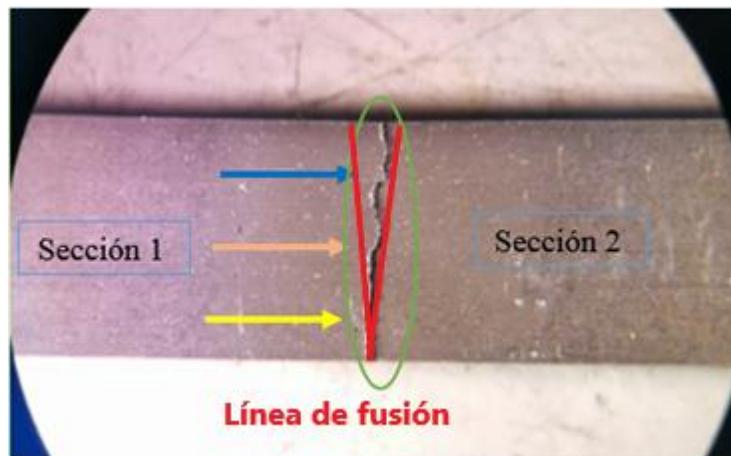


Figura 6.18. Fotografía de la probeta fracturada por el ensayo de tracción.

En el ensayo de tracción se analizan 2 probetas diferentes, ambas probetas no se encuentran estandarizadas por lo cual es complicado realizar las pruebas debido a que sus dimensiones son pequeñas (ver tabla 6.8). Para realizar el análisis de las fracturas se divide cada una de las probetas en 3 zonas a lo largo de la fractura.

Para la primera probeta, la zona 1 está marcada con un recuadro azul como se indica en la figura 6.16 (sección 1) y figura 6.17 (sección 2) en ambas zonas se observa que la fractura es 100% dúctil, con presencia de poros pequeños que son provenientes de las burbujas de gas atrapado en el proceso de soldadura, es posible ver que el material sufre una deformación plástica en toda esta zona.

Para la zona 2 que se encuentra señalada con recuadros de color naranja en las figuras 6.16 (sección 1) y 6.17 (sección 2) se observa que en ambas secciones la fractura es 100% dúctil de acuerdo con la deformación de arrancamiento que presentan en esta área, en la sección 1 se puede apreciar presencia de 3 poros formados por gas atrapado, uno en la zona central y dos lados derechos del recuadro, mientras que en la sección 2 solo se observa 1 poro lado izquierdo inferior.

La zona 3 está señalada con un recuadro de color amarillo en la figura 6.16 (sección 1) y en la figura 6.17 (sección 2), en donde se observa que la fractura en ambas secciones es 100% dúctil, por la deformación plástica en toda la superficie, en la sección 1 de lado derecho se observa un defecto de mayor dimensión, el cual podría ser una porosidad alineada y en la sección 2 no se observa la presencia de porosidad o micro-rechupes.

La figura 6.18 muestra la unión de las dos secciones que componen la probeta 1, donde se observa la fractura superficialmente, en la cual no es posible ensamblar a la perfección ambas secciones, ya que, en las zonas 1 y 2 presentan una fractura continua no lineal (distintas direcciones), mientras que la zona 3 presenta una fractura continua lineal.



Figura 6.19. Fractura de la sección 1 de la probeta utilizada en el ensayo de tracción con presencia de óxido y escoria.

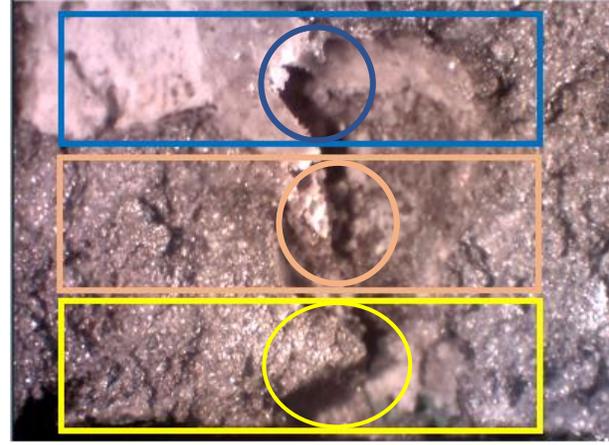


Figura 6.20. Fractura de la sección 2 de la probeta utilizada en el ensayo de tracción con presencia de óxido y escoria.

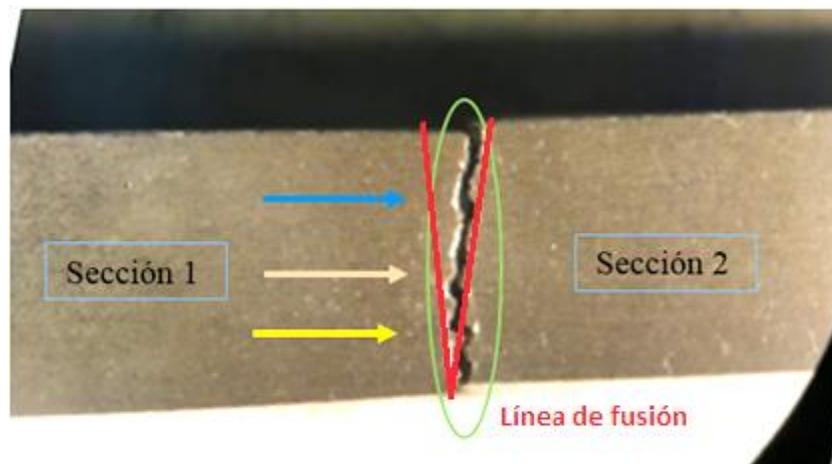


Figura 6.21. Fotografía de la probeta fracturada por el ensayo de tracción.

La fractura de la placa 2 también se divide en 3 zonas para su análisis, la zona 1 está señalada con recuadros azules en las figuras 6.19 (sección 1) y 6.20 (sección 2). En ambas secciones se observan fracturas 100% dúctiles. En la sección 1 se observa en la zona central y de lado derecho superior la presencia de cúmulos de escoria y óxidos provenientes del proceso de soldadura, mientras que en la sección 2 del lado izquierdo también hay presencia de escoria con óxido y en parte del centro señalado con un círculo se puede ver el inicio de una fractura interna de

aproximadamente 1 mm de separación (ancho) y 1 o 2 mm de profundidad, la cual pudo ser causada por defectos en la soldadura.

Para la zona 2 se utilizan recuadros naranjas para delimitar la zona. Al igual que en la zona 1, la fractura en ambas secciones es 100% dúctil, en la sección 1, zona centro aún se observa el mismo cúmulo de escoria y óxidos en menor proporción que en la zona 1. En la sección 2 (figura 6.20) hay un círculo en la parte central en donde se observa la continuidad de la fractura de la zona 1, con una disminución en las dimensiones de anchura y profundidad, así como una menor presencia de escoria en la misma zona.

La zona 3 está señalada con recuadros de color amarillo en las figuras 6.19 (sección 1) y 6.20 (sección 2), ambas secciones presentan una fractura 100% dúctil, la deformación plástica se da en la totalidad de la superficie, sin embargo, en la sección 1 se observa en el centro una fractura interna en el material con presencia de escoria y óxidos producidos en el proceso de soldadura.

En la sección 2 se encuentra un círculo amarillo el cual señala la continuidad y el final de la fractura interna que inició en la zona 1, en esta área ya no se observa ningún rastro de escoria con óxido, pero la fractura sí se corrió hacia el lado izquierdo.

La figura 6.21 muestra la unión de las dos secciones de la probeta 2 en zona fracturada, se puede observar que ambas secciones no se vuelven a ensamblar, entre ellas queda un espacio de separación aproximado de 0.5 mm, esta probeta tiene una fractura continua en varias direcciones (no es lineal).

6.8 Ensayo de líquidos penetrantes

En la prueba no destructiva de líquidos penetrantes, se realiza una inspección en la zona horizontal de la pieza para determinar los defectos que se generan en las zonas de estudio (material base, ZAC, material de aporte), durante el proceso de soldadura tales como, porosidades y rechupes, tal como se observa en la siguiente tabla. (Tabla 6.9)

Tabla 6.9. Resultados de la prueba de líquidos penetrantes

Número de placa	Placa	Área de inspección	Número de poros presentes	Clasificación de poros
1		10.64 cm ²	5	< 1mm (Redondas)
2		9.98 cm ²	13	< 1mm (Redondas)
3		8.53 cm ²	7	< 1mm (Redondas)

En la tabla 6.9 se observan las 3 piezas analizadas, en la placa 1 con una área de inspección de 10.64 cm^2 se observaron 5 poros entre las zonas de interfase de lado izquierdo donde solo el poro central podría ser crítico, ya que su diámetro es mayor que el resto de poros, en la placa 2 con área de inspección de 9.98 cm^2 se ubican 13 poros, todos en la zona de interfase, 9 de los 13 poros se registraron de lado izquierdo, por último en la placa 3 con área de inspección de 8.53 cm^2 se encontraron 7 poros de lado izquierdo y ubicados de igual manera en la zona de interfase.

Todos los poros que se encuentran en las 3 placas analizadas tienen dimensiones menores a 1 mm de diámetro y con clasificación redonda.

Capítulo 7: Discusión de resultados y conclusiones.

El proceso de soldadura por arco eléctrico usando electrodo revestido es posible realizarlo considerando las siguientes condiciones de amperaje, precalentamiento, velocidad de arrastre y técnica de soldeo.

Para determinar los parámetros óptimos en este trabajo se realizaron varias pruebas donde se modificaron 2 de las variables consideradas importantes, variación en la intensidad de corriente y en la temperatura de precalentamiento.

Para determinar la calidad de la soldadura y posibles fallas en el material, se realizaron ensayos destructivos y no destructivos. Algunas de las pruebas mecánicas nos indican qué tipo de fractura tiene el material y cuál es el trayecto de la fractura. Como se observa en las figuras correspondientes de la prueba de tracción y de impacto todas las fracturas se dieron en la zona de interfase creciendo hacia el material de aporte, lo que indica que el material de aporte tuvo una buena adherencia al material base, lo cual es posible determinar al observar de manera precisa con la interpretación metalográfica. También es posible ver la unión de ambos materiales y las zonas que se forman durante el proceso de soldadura como, material base–zona ZAC–línea de fusión–material de aporte.

Los estudios metalográfico por microscopia electrónica de barrido, es una técnica importantes para determinar la microestructura del material, ya que el material no cuenta públicamente con una hoja de composición certificada o publicada por la industria automotriz, en el estudio metalográfico del material base se observa que se trata de una aleación Al–Si por su microestructura y con el análisis químico por espectroscopia de energía dispersiva (EDS por sus siglas en inglés) se puede comprobar; en tanto que para el material de aporte de acuerdo con su microestructura, y de los análisis químico por EDS y MEB se determinó que se trata de una aleación Al–Si–Mn, con otros elementos como Fe, Cu, Cr y Zn entre otros, los cuales generan presencia de intermetálicos en el material.

Con las pruebas de dureza y de microdureza se observa que el material tiene una variación pequeña entre los materiales de aporte y base, tomando en cuenta que el aluminio es un material

de baja dureza y las escalas que se utilizaron Rockwell H (dureza) y Vickers (microdureza) se puede considerar una dureza uniforme a lo largo de toda la placa soldada.

El ensayo no destructivo que se realizó fue el de líquidos penetrantes, con el cual se determinó que todas las porosidades que presenta el material se clasifican como redondas con un diámetro menor a 1 mm, lo que determinaría que no hay riesgo de que falle el material.

CONCLUSIÓN

Considerando el estudio y las modificaciones de los parámetros involucrados en el proceso de soldadura por arco eléctrico usando electrodo revestido, así como las pruebas realizadas para determinar la calidad de la soldadura obtenida, es importante mencionar que la calidad de tal soldadura depende totalmente de 3 factores:

1. Determinación y control de parámetros en el proceso
2. Área de trabajo (recursos disponibles)
3. Habilidad de soldador.

De acuerdo con esto, se determinó que las condiciones óptimas para este proceso SMAW de componentes automotrices de aluminio son:

- Temperatura de Pre calentamiento de las placas es de 120°C
- Intensidad de corriente: 180 A.
- Tipo de corriente: Corriente Directa.
- Técnica de soldeo: arrastre.
- tiempo de permanencia en la mufla de 5 minutos, después de llegar a la temperatura de pre calentamiento

Se consideran condiciones optimas ya que, bajo esas condiciones, se obtuvo una soldadura de buena calidad o soldadura sana, ya que no hay riesgo de falla en la pieza, a pesar de no contar con las condiciones adecuadas en el área de trabajo tales como; control en la temperatura del ambiente, control del porcentaje de humedad, entre otras.

Podemos decir que los objetivos generales y específicos de este trabajo fueron cumplidos:

- ✓ Se determinó la influencia de los parámetros en proceso SMAW
- ✓ Se estableció un desarrollo experimental en el proceso SMAW
- ✓ Se generaron uniones de soldadura en placas de Al- Si obtenidas de un “monoblock”
- ✓ Se evaluó la calidad de la soldadura por medio de ensayos destructivos y no destructivos.

Se comprobó de manera favorable la hipótesis planteada al inicio de la tesis, teniendo una metodología de trabajo establecida y conociendo la influencia de los parámetros en proceso de soldadura SMAW, así como sus valores, el proceso se vuelve más sencillo y se pueden obtener soldaduras de mejor calidad en talleres con recursos limitados.

Bibliografía

- [1] American Welding Society. (1996). *Manual de soldadura* (8a ed., Vol. 1). México: Pearson Educación.
- [2] American Welding Society. (s.f.). *Welding inspection*. Nueva York.
- [3] American Welding Society, Welding Handbook. (s.f.). *Diffusion welding and brazing* (7a ed.).
- [4] ASM Handbook, . (1989). *Nondestructive evaluation and quality control* (9th ed., Vol. 7).
- [5] ASM Handbook. (1990). *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials* (Vol. 2). Miami.
- [6] ASM Handbook. (s.f.). *Metallography and microstructures: Aluminum alloys*. Miami.
- [7] ASM Handbook. (s.f.). *Welding brazing and soldering* (Vol. 6). Miami
- [8] Asta, E. (2007). *Introducción a la soldadura de acero*.
- [9] Avner, S. H. (s.f.). *Introducción a la metalurgia física*. McGraw-Hill.
- [10] Brown, T. L. (1998). *Química, la ciencia central* (10 ed.). México: Perason.
- [11] Caballero Gregorio, R. P. (2016). *Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación*. Obtenido de <http://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html> (consulta 04 de febrero 2020)
- [12] Castillo G., I. H. (2013). *Ensayos no destructivos mediante ultrasonido en equipos térmicos*. Chile.
- [13] Donald R. Askeland, P. P. (2012). *Ciencia e ingeniería de materiales*. México : Cengage Learning.
- [14] *El aluminio en la fabricación de carrocerías de automóviles*. (2012). Obtenido de http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R52_A2.pdf (13 de mayo 2020)
- [15] Empresa Lincoln Electric. (2016). *Soldeo manual con electrodos revestidos*.
- [16] Federación de Enseñanza de CC.OO de Andalucía. (noviembre de 2011). *Metalografía*. Obtenido de Revista digital para profesionales de la enseñanza : <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8732.pdf> (25 de abril 2020)

- [17] Federico, M. D. (2016). *Fabricación y caracterización de la aleación de aluminio reciclado con adición de silicio particulado*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/77278639.pdf> (consulta 16 de mayo 2020)
- [18] Grupo Infra. (s.f.). *Electrodos infra* . Obtenido de Electrodo de aluminio : <https://grupoinfra.com/files/libreria-de-descargas/ft-aw-2201.pdf> (consulta 03 de febrero 2020)
- [19] Herrero Teran, M. M. (2003). *Sistema experto para diagnosticar y corregir causas de defectos en soldadura metalica con arco protegido (smaw)* . México.
- [20] Horwitz Henry, P. (1990). *Soldadura: Aplicaciones y practica*. México: Alfaomega.
- [21] Infrasur. (s.f.). *Manual de electrodos para soldar*. Obtenido de http://www.infrasur.com.mx/uploads/manuales/soldadura/manual_electrodos/introduccion.pdf (consulta 09 de febrero 2020)
- [22] Ingemecánica . (2020). *Patologías de las Uniones Soldadas*. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn55.html> (consulta 28 de mayo 2020)
- [23] Ingemecánica. (2020). *Clasificación de los electrodos para soldadura* . Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn47.html> (consulta 26 de abril 2020)
- [24] José, G. M. (mayo de 2016). *Escalas de dureza*. Obtenido de <https://slideplayer.es/slide/12006162/> (consulta 06 de mayo 2020)
- [25] Maldonado, C. (s.f.). *Principios de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido*. Obtenido de <https://docplayer.es/64867380-11-1-principios-11-soldadura-por-arco-electrico-con-electrodo-revestido-diplomado-soldadura-cuauhtemoc-maldonado-1.html> (consulta 18 de abril 2020)
- [26] Malishev, G. N. (s.f.). *Tecnología de los metales* (7a ed.). MIR.
- [27] MIPSAs. (s.f.). *Soldadura, inspección por líquidos penetrantes* . Obtenido de usos y aplicaciones : <https://www.mipsa.com.mx/procesos/soldadura/inspeccion-por-liquidos-penetrantes/> (consulta 02 de junio 2020)
- [28] Oliver, J. (mayo de 2005). *Estudio de la implantación de una unidad productiva dedicada a la fabricación de conjuntos soldados de aluminio*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2833/41774-8.pdf?sequence=8&isAllowed=y> (consulta 08 de agosto 2020)

- [29] Raquel, S. (2015). *Ensayos no destructivos: Líquidos penetrantes*. Obtenido de http://www.raquelserrano.com/wp-content/files/ciencias_t8.3_liq_penetrantes.pdf (consulta 14 junio 2020)
- [30] Struers Ensuring Certainty. (s.f.). *Ensayos de dureza*. Obtenido de <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing#> (consulta 13 de junio 2020)
- [31] Unidad de investigación en materiales cerámicos y vítreos. (s.f.). *Microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis*. Obtenido de <https://www.uv.es/~uimcv/Castellano/Cursodoctorado/SEMPRG.PDF> (consulta 22 julio 2020)
- [32] William D., C. (s.f.). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona: Reverté, S. A.
- [33] Wilson T., R. N. (2016). *Escala de dureza Rockwell*. México.