

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO METALÚRGICO Y PROPIEDADES  
MECÁNICAS EN UNIONES DE ALEACIONES DE ALUMINIO 6061-T6 Y  
7075-T6 PARA APLICACIONES EN INDUSTRIA DE TRANSPORTE UNIDAS  
MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA GTAW**

**POR**

**ANTONIO DE LA CRUZ CARDONA**

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

**SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A DICIEMBRE DE 2015**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO METALÚRGICO Y PROPIEDADES  
MECÁNICAS EN UNIONES DE ALEACIONES DE ALUMINIO 6061-T6 Y  
7075-T6 PARA APLICACIONES EN INDUSTRIA DE TRANSPORTE UNIDAS  
MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA GTAW**

**POR**

**ANTONIO DE LA CRUZ CARDONA**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A DICIEMBRE DE 2015**

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO METALÚRGICO Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN UNIONES DE ALEACIONES DE ALUMINIO 6061-T6 Y 7075-T6 PARA APLICACIONES EN INDUSTRIA DE TRANSPORTE UNIDAS MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA GTAW”**, realizada por el alumno (a) **ANTONIO DE LA CRUZ CARDONA**, con número de matrícula **14ES171** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial



---

**Dra. Rocio Saldaña Garcés**

Tutor Académico



---

**Dr. Felipe De Jesús García Vázquez**

Asesor



---

Vo.Bo.

**Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés**

Coordinador de Posgrado

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **ANTONIO DE LA CRUZ CARDONA**, una vez leída y revisada la Monografía titulada **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO METALÚRGICO Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN UNIONES DE ALEACIONES DE ALUMINIO 6061-T6 Y 7075-T6 PARA APLICACIONES EN INDUSTRIA DE TRANSPORTE UNIDAS MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA GTAW”**

Aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 27 días del mes de noviembre de 2015.



---

**Dr. Emmanuel José Gutiérrez  
Castañeda**  
Presidente



---

**Dr. Héctor Manuel  
Hernández García**  
Secretario



---

**Dra. Rocio Saldaña Garcés**  
Vocal

# DEDICATORIA

A mis padres, Patricia y Antonio. Les agradezco por todo su comprensión, apoyo y la confianza para la realización de mi vida, por guiarme siempre por el camino del bien con consejos y motivaciones y llenar el camino de cariño y amor familiar.

A mis hermanas porque con su cariño y hermandad y apoyo incondicional que siempre me lo han demostrado y siempre están al pendiente de mí y siempre demostrándome sus muestras de cariño.

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA) por la oportunidad brindada para cursar la Especialidad en Tecnología de la Soldadura Industrial, así como también al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo para llevar a cabo este proyecto.

Agradezco a los maestros de la especialidad por sus enseñanzas, consejos y apoyo a lo largo de mi preparación.

A mi tutora y asesor por su apoyo, recomendaciones y enseñanzas proporcionadas para la realización de esta monografía.

. A mis compañeros por su amistad y apoyo durante este trayecto.

Agradezco a mi familia por el apoyo incondicional y motivaciones aliento y cariño a lo largo de toda la especialidad

# ÍNDICE

ÍNDICE .....	7
SÍNTESIS.....	10
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 ANTECEDENTES. ....</b>	<b>11</b>
<b>1.2 OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
1.2.1 OBJETIVO GENERAL .....	12
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
<b>1.3 JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>13</b>
<b>1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>14</b>
<b>1.5 APORTACIÓN.....</b>	<b>14</b>
<b>1.6 ALCANCE .....</b>	<b>14</b>
<b>2 ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 ALEACIONES DE ALUMINIO .....</b>	<b>16</b>
2.1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO SEGÚN ELEMENTOS DE ALEACIÓN.....	16
2.1.2 INFLUENCIA DE ELEMENTOS DE ALEACIÓN .....	18
2.1.3 TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN LAS ALEACIONES DE ALUMINIO .....	20
2.1.4 SOLDADURA EN EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES (6).....	21
2.1.4.1 Efecto del oxígeno en aleaciones de aluminio (6).....	22
2.1.4.2 Solubilidad del Hidrógeno (6).....	23
2.1.4.3 Características térmicas (7).....	23
<b>2.2 ALUMINIO 6061-T6. ....</b>	<b>24</b>
2.2.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA .....	25
2.2.2 PROPIEDADES FÍSICAS .....	25
2.2.3 PROPIEDADES MECÁNICAS .....	25
2.2.4 APLICACIONES (9).....	26
2.2.5 TRATAMIENTOS TÉRMICOS .....	26
<b>2.3 ALUMINIO 7075-T6 (13) .....</b>	<b>27</b>
2.3.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	27
2.3.2 PROPIEDADES FÍSICAS .....	28

2.3.3	PROPIEDADES MECÁNICAS .....	28
2.3.4	APLICACIONES (11).....	29
2.3.5	TRATAMIENTO TÉRMICO (11).....	30
<b>2.4</b>	<b>PROCESO DE SOLDADURA GTAW (15) .....</b>	<b>35</b>
2.4.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO .....	36
2.4.2	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO.....	37
2.4.3	VARIABLES DEL PROCESO (15).....	37
2.4.3.1	Corriente del arco.....	37
2.4.3.2	Voltaje del arco.....	38
2.4.3.3	Velocidad de recorrido .....	38
2.4.4	EQUIPO (15).....	38
2.4.4.1	Sopletes .....	38
2.4.4.2	Electrodos .....	39
2.4.4.3	Fuentes de potencia.....	39
2.4.5	GASES DE PROTECCIÓN (15).....	40
2.4.5.1	Argón (16) .....	41
2.4.5.2	Helio (16).....	41
2.4.5.3	Mezcla de argón e hidrógeno (16) .....	41
2.4.6	METAL DE APORTE (16).....	42
2.4.7	CALIDAD DE LA SOLDADURA (15) .....	42
2.4.7.1	Discontinuidades y defectos .....	42
2.4.7.2	Inclusiones de tungsteno .....	42
2.4.7.3	Falta de protección.....	43
<b>2.5</b>	<b>SOLDABILIDAD DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO (17).....</b>	<b>43</b>
2.5.1	EFFECTOS CALORÍFICOS EN EL PROCESO.....	44
2.5.2	PELÍCULA DE ÓXIDO RESISTENTE .....	44
2.5.3	AUMENTO DE POROSIDAD EN PROCESO GTAW .....	44
2.5.4	SUSCEPTIBILIDAD A FRACTURAS EN CALIENTE .....	45
<b>2.6</b>	<b>METALURGIA DE LA SOLDADURA .....</b>	<b>47</b>
2.6.1	DIAGRAMAS DE FASE DE EQUILIBRIO (17).....	47
2.6.2	INCLUSIONES (ÓXIDOS) (17) .....	49
2.6.3	POROSIDAD (17).....	50
2.6.4	CONSTITUYENTES (17).....	52
2.6.5	PRECIPITADOS (17). .....	52
<b>2.7</b>	<b>TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN.....</b>	<b>56</b>
2.7.1	MICROSCOPIA ÓPTICA.....	56
2.7.2	MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (19). .....	56
<b>2.8</b>	<b>PROPIEDADES MECÁNICAS (20). .....</b>	<b>58</b>



2.8.1	ENSAYO DE TENSIÓN.....	58
2.8.2	ENSAYO DE DUREZA.....	59
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO III. ....</b>	<b>60</b>
<b>4</b>	<b>CASO DE ESTUDIO .....</b>	<b>63</b>
<b>4.1</b>	<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>64</b>
4.1.1	MATERIALES Y EQUIPO.....	64
<b>4.2</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ....</b>	<b>67</b>
4.2.1	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO .....	70
4.2.2	PROPIEDADES MECÁNICAS .....	73
4.2.2.1	Pruebas de tensión .....	73
4.2.2.2	Ensayo de dureza .....	75
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>77</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>79</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>85</b>
<b>8</b>	<b>RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO .....</b>	<b>88</b>

# SÍNTESIS

En el presente trabajo se realizó un estudio de los efectos que causan los parámetros de soldadura de arco con electrodo de tungsteno no consumible (GTAW), en uniones similares de placas de aleaciones de aluminio 6061-T6 y 7075-T6 con un espesor de 6 mm, las cuales son las más empleadas en diversos componentes en la industria aeroespacial y automotriz, industrias a las que está enfocada dicha investigación. Para llevar a cabo este estudio fue necesario el análisis del estado del arte, el cual abarca todo lo referente a la metalurgia de las aleaciones de aluminio, su soldabilidad y al proceso GTAW.

La principal motivación de este estudio, está enfocada en el impacto de la variación en los parámetros de soldadura tanto en las propiedades mecánicas, químicas y su morfología.

Para identificar algunos de los parámetros adecuados para éstas uniones, es necesario considerar la composición química del metal base como del metal de soldadura, para identificar la variabilidad de los parámetros empleados. Se llevaron a cabo 3 muestras de uniones, estas se hicieron a tope con una separación de 0.03 mm de las aleaciones antes mencionadas para posteriormente ser sometidas a análisis microestructural, microdureza y ensayo de tensión. Las microestructuras fueron similares, en ambas aleaciones se notó la presencia de elevada porosidad, lo cual disminuyó considerablemente sus propiedades mecánicas. Algunos parámetros con los que se unió cada aleación fueron los siguientes: para las muestras de la aleación 6061-T6 se trabajó con voltaje de 16, 18 y 20 y con intensidad de corriente de 160, 180 y 190 A, esto para las muestras 1 2 y 3 respectivamente. Para el caso de la aleación 7075-T6 el voltaje fue fijo de 17 V para las 3 muestras, y una intensidad de corriente de 150, 160 y 170 A respectivamente para las muestras 1.2 y 3

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes.

En la actualidad, los procesos de soldadura constituyen uno de los recursos tecnológicos de mayor importancia para el desarrollo a nivel global como se emplea en el caso de la industria minera, agrícola, de construcción, entre otras.

Esta investigación tiene su interés en la unión de aleaciones de aluminio bajo el proceso de soldadura por arco de tungsteno y gas o Gas Tungsten Arc Welding (GTAW por sus siglas en inglés), el cual consta de un electrodo no consumible, un gas que protege al material de posibles contaminantes y en el cual el metal de aporte, puede ser opcional. Este proceso se ha convertido en herramienta fundamental en el campo industrial para producir soldaduras de gran calidad, con un equipo relativamente económico.

En la actualidad, los componentes compuestos en su mayoría de aluminio se utilizan cada vez más en los sectores de la industria de transporte,

principalmente en la industria automotriz y la industria aeroespacial debido a la ligereza del material ya que reduce el peso total y esto lo hace atractivo para la fabricación de vehículos y naves.

Mediante un caso de estudio se desea conocer las propiedades metalúrgicas y mecánicas resultantes de la unión de las aleaciones de aluminio al ser unidas por el proceso de soldadura GTAW, con el fin de evaluar las fases presentes, transformaciones y posibles efectos que resulten en el material.

Dentro de la gama de las aleaciones de aluminio, la A6061-T6 y la A7075-T6 son de las más utilizadas tanto en la industria automotriz como en la aeroespacial. En la industria del transporte, el aluminio se utiliza para la construcción de aviones, de vagones ferroviarios, de automóviles, así como para la fabricación de motores de combustión interna, por mencionar algunos.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Desarrollar un documento de consulta que concentre la información sobre el comportamiento metalúrgico así como de las propiedades mecánicas de uniones similares de aleaciones de aluminio A6061-T6 y A7075-T6 empleadas en la industria automotriz y aeroespacial unidas mediante el proceso de soldadura GTAW

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- 1) Recopilar información del estado del arte sobre el comportamiento metalúrgico de uniones de aleaciones de aluminio mediante el proceso GTAW así como su impacto en propiedades mecánicas.

- 2) De acuerdo a la literatura, obtener los parámetros adecuados para llevar a cabo uniones mediante el proceso de soldadura GTAW.
- 3) Realizar un caso de estudio elaborando uniones similares de placas de aluminio A6061 T6 y A7075 T6 mediante los parámetros obtenidos anteriormente en la literatura mediante dicho proceso.
- 4) Llevar a cabo un análisis microestructural y de propiedades mecánicas (tensión y microdureza) de las placas soldadas con anterioridad.

### **1.3 Justificación**

En la actualidad, la industria está exigiendo la selección de materiales de bajo peso específico para lograr mayores eficiencias y mejores comportamientos en las diferentes aplicaciones que así lo requieran, como es el caso de la industria automotriz y aeroespacial, en donde se evalúan constantemente el desempeño de sus productos con el propósito de mejorar sus características y propiedades.

Esto ha incrementado el uso de materiales más ligeros como las aleaciones de aluminio, ya que proveen características superiores de resistencia y baja densidad traduciéndolo en un ahorro en peso y energía, además que poseen un óptimo rendimiento ante la corrosión.

De igual manera, se genera la necesidad de utilizar procesos de unión en los componentes fabricados con estas aleaciones, sin embargo, aún y cuando se tengan metodologías para llevar a cabo correctamente el proceso, se presentan fallas y no garantizan su resistencia.

De ahí la importancia de este trabajo, lo cual aportará información relevante respecto al comportamiento metalúrgico y de propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio unidas mediante el proceso de soldadura GTAW.

## **1.4 Planteamiento del problema**

Conocer los diferentes defectos y efectos causados por la soldadura GTAW en las propiedades mecánicas y metalúrgicas de aleaciones de aluminio utilizadas en la industria del transporte.

El conocimiento de los fenómenos metalúrgicos que tienen lugar en el charco de soldadura, permitirán comprender las condiciones que promueven o inhiben la aparición de defectos en las aleaciones de aluminio 6061-T6 y 7075-T6 para aplicaciones en industria de transporte unidas mediante el proceso de soldadura GTAW, lo anterior con implicaciones positivas en el control de la calidad en los procesos de manufactura.

## **1.5 Aportación**

Reunir información que ayude a comprender el comportamiento metalúrgico de las uniones de aleaciones similares de aluminio 6061-T6 y 7075-T6 al ser sometidas al proceso de soldadura por arco como el GTAW para de esta manera relacionarlo con el impacto en sus propiedades mecánicas.

## **1.6 Alcance**

Este proyecto se enfocará únicamente al estudio de las aleaciones A6061-T6 y A7075-T6 unidas mediante el proceso de soldadura GTAW, llevando a cabo su caracterización microestructural y evaluación de propiedades mecánicas como dureza y tensión.

## CAPÍTULO II

# ESTADO DEL ARTE

El aluminio fue descubierto en el año de 1825 en Dinamarca por el farmacéutico Hans Christian Oersted, aislando el aluminio elemental de su óxido (alúmina), empleando corrientes eléctricas. La producción de éste metal comenzó en el año de 1854 y ha ido en aumento, ocupando el segundo lugar a nivel mundial ya que incrementó su producción tres veces más en comparación que el acero (1).

Martin Hall desarrolló el proceso de reducción de óxidos de aluminio ( $Al_2O_3$ ) en 1886, esto para la obtención de aluminio por electrólisis. El desarrollo de este proceso es de gran importancia ya que la alúmina no es sencilla de separar del aluminio puesto que existe entre ellos un fuerte enlace (1).

El aluminio y sus aleaciones desde hace algunos años han ocupado un lugar importante entre la industria del transporte, esto por sus características como alta dureza, ligereza, conductividad térmica, resistencia mecánica, entre otras propiedades, las cuales son fundamentales para la industria del transporte como lo son la industria aeronáutica y la automotriz.

## **2.1 Aleaciones de aluminio**

El aluminio puro como tal es un material blando y de poca resistencia mecánica. Al adicionarle pequeñas cantidades de otros elementos, las aleaciones de aluminio mejoran sus propiedades tales como la resistencia mecánica y la dureza.

Entre los elementos más utilizados para formar aleaciones con el aluminio están el Fe, Mg, Zn, Si, Cu, Ti, Cr, Li, B, W, Ni, Zr, S. Las propiedades finales dependen principalmente de cuál sea el fin específico de la aleación y así poder modificarlas según sus requerimientos.

Estas aleaciones son comúnmente conocidas como ligeras, ya que poseen una menor densidad comparadas con el acero. Esta ligereza ha llevado a la industria a emplearlas principalmente a la del transporte, ya que proporciona un menor peso en vehículos, brindando ventajas adicionales como la reducción en el consumo de combustible y una disminución notable de los gases contaminantes que causan daños graves e irreparables a la atmósfera.

Los diferentes tipos de aleaciones de aluminio ofrecen una amplia gama de capacidades y debido a esto se consideran como el material de elección para numerosos productos y mercados.

### **2.1.1 Clasificación de las aleaciones de aluminio según elementos de aleación.**

Las aleaciones de aluminio se clasifican en dos grupos, aluminios laminados y fundiciones de aluminio. Los productos de aluminio puro y sus aleaciones se clasifican mediante un sistema de cuatro dígitos, la clasificación de las aleaciones están establecidas por el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares, ANSI por sus siglas en inglés (American National Standard Institute).



El primer dígito se refiere al principal elemento de aleación (Xxxx), el segundo dígito en la designación (xXxx) indica la modificación en la aleación, si es un cero significa que es una aleación original, si es entre el uno y el nueve indica modificaciones menores a la primera; el tercero y cuarto dígito (xxXX), representan el número consecutivo de la aleación. En la Tabla 2.1 se mencionan las principales aleaciones de aluminio de fundición, su designación así como su elemento predominante de aleación.

Tabla 2.1 Clasificación de las aleaciones de aluminio según sus elementos de aleación (3).

Aleación	Principal elemento de aleación
Serie 1xxx	Aluminio sin alear
Serie 2xxx	Aluminio-cobre
Serie 3xxx	Aluminio – Manganeso
Serie 4xxx	Aluminio – Silicio
Serie 5xxx	Aluminio- Magnesio
Serie 6xxx	Aluminio – Magnesio – silicio
Serie 7xxx	Aluminio – Zinc
Serie 8xxx	Aluminio – otros elementos

*Serie 1xxx.* Contiene aluminio en un 99.00% y es utilizado especialmente en los campos eléctricos y químicos.

*Serie 2xxx.* El cobre es el principal elemento presente en este tipo de aleación (Al-Cu).

*Serie 3xxx.* El manganeso entre el 1% al 5% es el principal elemento de aleación. Su principal aplicación se puede observar en latas de bebidas, utensilios de cocina.

*Serie 4xxx.* El principal elemento es el silicio. Éste reduce la fragilidad que se produce durante la fusión. Esta aleación es importante en la fabricación de alambres de soldadura.

*Serie 5xxx.* El principal elemento de aleación para esta serie es el magnesio. Esta serie de aleaciones presenta buenas características de soldadura y buena resistencia a la corrosión en ambientes marinos.

*Serie 6xxx.* Las aleaciones de este tipo de serie contienen silicio y magnesio para la formación de siliciuro de magnesio ( $Mg_2Si$ ), este compuesto hace que puedan ser tratadas térmicamente. Tienen buena resistencia a la corrosión ocasionada por el aire, son muy aptas para métodos de extrusión y forja en caliente. Además de buena soldabilidad, maquinabilidad y resistencia a la corrosión.

*Serie 7xxx.* A este grupo pertenecen las aleaciones de aluminio con zinc, en cantidades promedio del 1% al 8%, puede tratarse térmicamente para lograr un alto nivel de resistencia. Son ampliamente utilizadas en estructuras de fuselajes de aviones, equipos móviles y piezas sujetas a altas tensiones de trabajo en la industria aeroespacial. Estas aleaciones tienen una reducida resistencia a la corrosión y a menudo se utilizan ligeramente sobre-envejecidas para proporcionar mejores combinaciones de resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y resistencia a la fractura.

*Serie 8xxx.* Se le adiciona hierro con el fin de refinar el grano, con lo cual se incrementa la resistencia a la fluencia de la aleación.

### **2.1.2 Influencia de elementos de aleación**

Los principales elementos de aleación son: cobre, silicio, manganeso, magnesio, litio y zinc. Otros elementos como el níquel, cromo, titanio, zirconio y el escandio pueden ser agregados en pequeñas cantidades para alcanzar

propiedades específicas. Otros elementos en contenidos mayores de 1% en peso son considerados impurezas indeseadas. Estos elementos son conocidos como elementos residuales, los cuales no tienen efectos benéficos en las propiedades mecánicas del aluminio y los fabricantes intentan eliminar de sus productos.

A continuación se resume los principales efectos de los elementos:

- Magnesio: Incrementa la resistencia por medio de la precipitación de soluciones sólidas y mejora la dureza por trabajado en frío.
- Manganeso: Incrementa la resistencia por medio de solubilidad y precipitación de la solución sólida.
- Cobre: Mejora la resistencia, permite el endurecimiento por precipitación, reduce la resistencia a la corrosión, la ductilidad y la soldabilidad.
- Silicio: Incrementa la resistencia y la ductilidad, en combinación con el magnesio produce endurecimiento por precipitación.
- Zinc: Incrementa la resistencia, permite el endurecimiento por precipitación, puede causar corrosión por esfuerzos.
- Hierro: Incrementa la resistencia del aluminio puro, generalmente es un elemento residual. Este elemento en contenidos elevados favorece la formación de intermetálicos en forma de aguja.
- Cromo: Incrementa la resistencia a la corrosión por esfuerzos.
- Níquel: Mejora la resistencia a temperaturas elevadas.
- Titanio: Se usa para refinar el tamaño de grano, particularmente en los metales de aporte.
- Zirconio: Igual que el Ti, se emplea refinar el grano microestructural.
- Escandio: Incrementa substancialmente la resistencia mediante endurecimiento por envejecido, elemento refinador de grano particularmente en el metal de soldadura.
- Plomo y Bismuto propician la formación de rebaba en las aleaciones para maquinados.

### 2.1.3 Tratamientos térmicos en las aleaciones de aluminio

Los aluminios en la industria son clasificados mediante códigos de letras establecidos para indicar e identificar qué procesos físicos y térmicos han intervenido en la elaboración del material final, entre los cuales se encuentran los siguientes:

F: Estado bruto. Es el material tal como sale del proceso de fabricación.

O: Recocido. Se aplica a materiales ya sea de forja como de fundición que han sufrido un recocido completo.

W: Solución tratada térmicamente. Se aplica a materiales que después de recibir un tratamiento térmico quedan con una estructura inestable y sufren envejecimiento natural.

H: Estado de acritud. Viene con materiales a los que se ha realizado un endurecimiento por deformación.

T: Materiales que han sido endurecidos por tratamiento térmico con o sin endurecimiento por deformación posterior. Sólo se aplican a aleaciones que sean termo-tratables. Dentro de esta designación se encuentran diferentes tipos de tratamientos térmicos entre los cuales se encuentran:

T1: Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una elevada temperatura y envejecido de forma natural.

T2: Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una alta temperatura, trabajado en frío y envejecido de forma natural.

T3: Solución tratada térmicamente, trabajada en frío y envejecida a temperatura ambiente hasta alcanzar una condición estable.

T4: Solución tratada térmicamente y envejecida a temperatura ambiente hasta alcanzar una condición estable.

T5: Enfriado desde un proceso de fabricación a alta temperatura y envejecido artificialmente.

T6: Solución tratada térmicamente y envejecida artificialmente. Son designados de esta forma los productos que después de un proceso de conformado a alta temperatura (moldeo o extrusión) no son endurecidos en frío sino que sufren un envejecimiento artificial.

T7: Solución tratada térmicamente y sobre envejecida para su completa estabilización.

T8: Solución tratada térmicamente, trabajado en frío y envejecido artificialmente.

T9: Tratado térmicamente por solución, envejecido por solución y después trabajado en frío.

T10: Enfriado desde una temperatura elevada en un proceso de formación, trabajado en frío, y después envejecido artificialmente.

#### **2.1.4 Soldadura en el aluminio y sus aleaciones (6).**

El aluminio y sus aleaciones pueden ser unidos por una gran variedad de métodos a diferencia de otras aleaciones. Los principales métodos que se usan son los procesos que involucran la protección de gas, los cuales se describen en este documento.

El aluminio tiene varias propiedades químicas y físicas que son de vital importancia al momento de realizar procesos que involucran la unión de varios

componentes y dispositivos. Las principales propiedades que afectan su soldabilidad son:

- Óxido superficial
- Solubilidad del hidrógeno en el aluminio fundido
- Características térmicas, eléctricas y no magnéticas
- Ausencia de color cuando es calentado
- Amplio rango de propiedades mecánicas y temperaturas de fusión que resultan por la adición de otros metales

#### *2.1.4.1 Efecto del oxígeno en aleaciones de aluminio (6).*

El aluminio tiene una fuerte afinidad al oxígeno y se oxida inmediatamente cuando se expone al aire. Los tratamientos térmicos y el almacenamiento en ambientes húmedos van a incrementar la capa de óxido, así como los tratamientos electroquímicos como el anodizado que es aplicado con fines decorativos, arquitectónicos o para resistencia al desgaste. La capa de óxido natural es lo suficientemente delgada y puede ser removida por los procesos de arco con protección de gas. Sin embargo, las capas gruesas de óxido deberán ser reducidas por medios químicos o mecánicos antes de la aplicación de la soldadura.

La elevada conductividad térmica del aluminio dificulta mantener una penetración uniforme. Al iniciar el proceso, la penetración es poca, con respecto al final, debido al precalentamiento que se va originando del material base a medida que se va ejecutando la soldadura.

El bajo punto de fusión del aluminio (660 °C, aproximadamente en estado puro) causa fusión en retroceso del electrodo, fundiendo el tubo de contacto y causando obstrucción en la alimentación del electrodo e interrupción del cordón.

Tanto el electrodo y el material base son susceptibles a una capa de oxidación ( $Al_2O_3$ ) que tiene un punto de fusión de 2020 °C aproximadamente,

cuando éste óxido se forma en la superficie se dificulta la disociación y puede ocurrir escurrimiento por la fusión interna del material base.

#### *2.1.4.2 Solubilidad del Hidrógeno (6).*

El hidrógeno se disuelve muy rápidamente en el aluminio fundido. Sin embargo disminuye su solubilidad en el aluminio sólido, se ha determinado que el hidrógeno es la causa principal de porosidad en las soldaduras de este material, las altas temperaturas en el charco de la soldadura permiten que una gran cantidad de hidrógeno sea absorbida, y cuando el charco solidifica, la solubilidad del hidrógeno se reduce. Si el hidrógeno no escapa por la soldadura solidificada, el exceso de éste propiciará la porosidad. Las fuentes de hidrógeno deberán ser eliminadas para producir soldaduras de calidad.

#### *2.1.4.3 Características térmicas (7).*

La conductividad térmica del aluminio es de alrededor de 6 veces la del acero. Aunque la temperatura de fusión del aluminio está substancialmente por debajo de las aleaciones ferrosas, se requiere de mayor ingreso de calor para soldar el aluminio debido a su alto valor de calor específico. La alta conductividad térmica hace al aluminio muy sensible a las fluctuaciones en el ingreso de calor en los procesos de soldadura. Es por ello que se requiere de un ingreso de calor constante con un proceso de soldadura rápido, como lo es el proceso GTAW, para evitar variaciones en penetración y fusión. La expansión térmica del aluminio es de alrededor de dos veces la del acero, y las soldaduras de aluminio se contraen alrededor de un 6% de volumen durante la solidificación. Los materiales delgados deberán ser sujetos por dispositivos o ser "punteados" en espacios cercanos para mantener los bordes de la unión alineados. Las contracciones pueden ser balanceadas por medio de la secuencia de la soldadura para controlar la distorsión.

## 2.2 Aluminio 6061-T6.

Esta aleación de aluminio es la menos costosa y más versátil de las aleaciones de aluminio tratables térmicamente. Posee muy buenas cualidades, de buenas propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, se caracteriza por ser una aleación dúctil, ligera, además tiene alta resistencia (parecida a la del acero), especialmente a la tensión y también posee buena trabajabilidad. La aleación puede ser fabricada por la mayoría de las técnicas de uso común (5,7).

Esta aleación es utilizada en estructuras tubulares en la mayoría de aeronaves experimentales tales como los modelos ultralivianos y aeronaves semejantes. Otras de sus aplicaciones son accesorios de aeronaves, pasadores de bisagras, pistones de freno y pistones hidráulicos. Además, es ideal para trabajos con un buen acabado superficial, presenta facilidad de maquinado, posee excelentes características para soldadura fuerte de arco, además de no ser tóxico. Sus características le hacen ser un material propio para uniones y acepta distintos recubrimientos (8).

En la actualidad, la mayoría de las investigaciones están enfocadas en las aleaciones de la serie 6xxx, pues en la industria automotriz se requiere del uso de placas que resistan la alta deformabilidad de modo que los paneles puedan ser estampados y se retengan e incluso aumenten su resistencia después de que se aplique el proceso de pintura por curado térmico; esto se logra debido a que ésta serie tiene contenidos de magnesio y silicio que propician la precipitación de precursores de equilibrio metaestables tales como el  $Mg_2Si$  (9).



### 2.2.1 Composición química

La matriz de aluminio oscila entre el 95.85 y 98.56% mientras que el resto de elementos de la aleación se encuentran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Composición química A6061 T6 (5)

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
(% e.p)	0.4-0.8	0-0.7	0.15-0.40	0-0.15	0.8-1.2	.04-.35	0-0.25	0-0.15

### 2.2.2 Propiedades físicas

Tal como se ha mencionado anteriormente, esta aleación posee buenas propiedades físicas, las cuales se pueden apreciar en la Tabla 2.3

Tabla 2.3 Propiedades físicas A6061-T6 (10)

Propiedad	Sistema métrico
Densidad	2.7 g/cm <sup>3</sup>
Coefficiente de Poisson	0.33
Punto de fusión	582 – 652°C
Conductividad térmica	167 W/mK

### 2.2.3 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de esta aleación dependen en gran medida del temperamento, o calor del material. Algunas de las características más importantes se describen a continuación en la Tabla 2.4

Tabla 2.4 Propiedades mecánicas A6061-T6 (10)

Propiedad	Sistema métrico
Resistencia a la fluencia	255 MPa
Resistencia máxima	290 MPa
Elongación	12%
Módulo de elasticidad	69 GPa

### **2.2.4 Aplicaciones (9)**

Esta aleación se utiliza para una amplia variedad de productos y aplicaciones de carrocerías de camiones y componentes estructurales. Se utiliza en donde se requiere una buena apariencia, además de una elevada resistencia a la corrosión, por dicha razón se utiliza ampliamente en la fabricación de elementos náuticos.

La aleación 6061-T6 tiene una buena respuesta a la soldadura, además de poseer una buena soldabilidad debido al gas inerte, tiene una excelente resistencia a la corrosión y buena resistencia tanto a agentes atmosféricos como marinos, se puede mecanizar y anodizar a la perfección.

También es usada para los moldes de inyección y soplado, así como en estructuras de aeronaves, en las alas y el fuselaje de aviones comerciales y de uso militar; refacciones industriales, construcción de yates, en piezas de automóviles, en la manufactura de latas de aluminio para el empaquetado de comida y bebidas; es fácil de maquinar y resistente a la corrosión.

### **2.2.5 Tratamientos térmicos**

Dentro de los tratamientos térmicos que se pueden realizar a esta aleación se encuentra el conocido como T6, en donde la aleación sufre un envejecimiento artificial a 177 °C con mantenimiento a esa temperatura durante 8 horas. La temperatura de solubilidad es de 529°C, dicho tratamiento mejora notablemente algunas de sus propiedades mecánicas, en la Figura 2.1 se muestra la representación gráfica del tratamiento descrito (5,11).

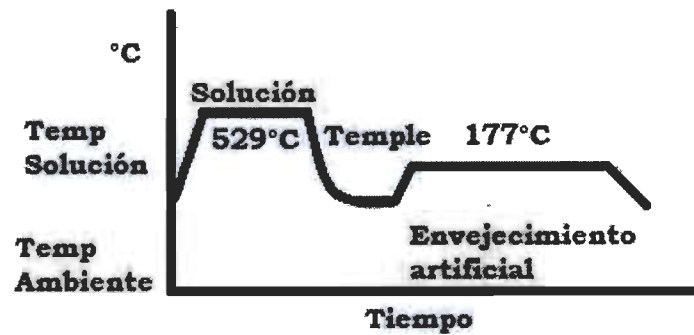


Figura 2.1 Esquema de tratamiento térmico T6 (11).

## 2.3 Aluminio 7075-T6 (13)

Es una aleación que tiene como principal elemento aleante el zinc. Es fuerte, con buena resistencia a la fatiga frente a otros metales y es fácil de mecanizar. Las principales ventajas de esta aleación, destacan su alta resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y a la fatiga, tiene alta dureza y alto índice de endurecimiento.

Es utilizada frecuentemente en aplicaciones para el transporte, náutica, el automovilismo, aviación, aplicaciones de modelismo en la industria de las bicicletas. Debido a la elevada relación que tiene entre resistencia y densidad se utiliza en la fabricación de fuselajes y además por sus propiedades térmicas y la posibilidad de ser pulido se emplea en la fabricación de molde.

### 2.3.1 Composición química.

Dentro de su composición contiene en mayores porcentajes elementos como el zinc, magnesio y cobre, tal como se puede observar en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Composición química de A7075-T6 (10).

Elemento (% e.p)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros
	0.4	0.5	1.2-2	Máx 0.3	2.1-2.9	0.18-0.28	5.1-6.1	0.2	0.15

### 2.3.2 Propiedades físicas

Al igual que la mayoría de las aleaciones de aluminio, la A7075-T6 posee buenas propiedades físicas, las cuales están reflejadas en la Tabla 2.6

Tabla 2.6 Propiedades físicas A7075-T6 (10).

Propiedad	Sistema métrico
Densidad	2.8 g/cm <sup>3</sup>
Coficiente de Poisson	0.33
Punto de fusión	475 – 630 °C
Conductividad Térmica (0-100°C)	130W/m-K

### 2.3.3 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas más relevantes de la aleación 7075-T6 se describen a continuación en la Tabla 2.7

Tabla 2.7 Propiedades mecánicas de la aleación A7075-T6 (10).

Propiedad	Sistema métrico
Resistencia a la fluencia	427 MPa
Resistencia máxima	503 MPa
Elongación	8%
Módulo de elasticidad	72 GPa

#### **2.3.4 Aplicaciones (11)**

La principal aplicación de la aleación 7075-T6 es en la industria de transporte, específicamente en la industria aeroespacial. Tienen aplicación en todas las estructuras aeronáuticas y aeroespaciales donde se requiere una combinación entre las principales características o propiedades del material, así como la resistencia a la corrosión.

### 2.3.5 Tratamiento térmico (11).

La aleación A7075, después de un recocido a 529°C, requiere de un envejecimiento artificial por lo que debe ingresar en un horno de atmósfera o de sales a una temperatura de 177°C por 24 horas para alcanzar la dureza y resistencia a la tensión máxima. Por lo tanto, este último tratamiento cambia la condición del aluminio A7075-T6, utilizado para moldes y piezas aeroespaciales que estén bajo esfuerzos a compresión. En la Figura 2.2 se puede apreciar una imagen representativa del tratamiento térmico T6.

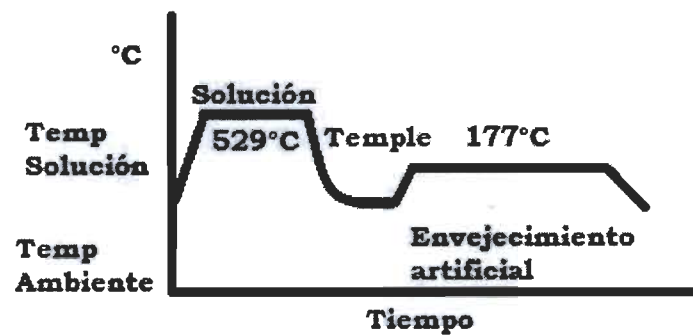


Figura 2.2 Tratamiento térmico de envejecido artificial T6 (11).

Los investigadores Sivashanmugam M. y colaboradores (2009) hicieron un estudio acerca de la microestructura y propiedades mecánicas de uniones de aleación de aluminio A7075 con una preparación con bisel en V sometido bajo el proceso de unión MIG así como también elaboraron pruebas de esta misma aleación con el proceso TIG, el gas de protección utilizado fue argón de alta pureza (99.99%). Las uniones que ellos evaluaron fueron a tope. Las propiedades evaluadas fueron la microdureza y la tensión además de la microestructura como se muestra en la Figura 2.3 y Figura 2.4; en la cual se

puede apreciar que entre mayor sea el calor aportado mayor es la zona de afectación por el calor.

Los ensayos de tensión fueron realizados bajo los criterios de la especificación ASTM (ASTM E8M-04). Los resultados obtenidos en la prueba muestran una resistencia a la tracción de  $549.86\text{N/mm}^2$ , un valor de límite elástico de  $413.66\text{ N/mm}$  y una elongación de  $5.66\text{mm}$ .

En cuanto al ensayo de microdureza, se practicó microdureza Vickers para las probetas unidas mediante los 2 procesos de soldadura tanto GMAW como GTAW, en los cuales fue utilizada una carga de  $300\text{gr}$ . Los resultados obtenidos para el proceso GMAW, (como se puede observar en la Figura 2.4) muestran un decrecimiento de la dureza en la zona soldada, esto atribuido a la presencia de precipitados gruesos. En comparación con estos resultados, las pruebas realizadas a las uniones por GTAW,(se puede ver en la Figura 2.3) presentan carburos precipitados, los cuales contribuyen con los altos niveles de dureza comparados con los valores de dureza de las probetas unidas con el proceso GMAW (14).

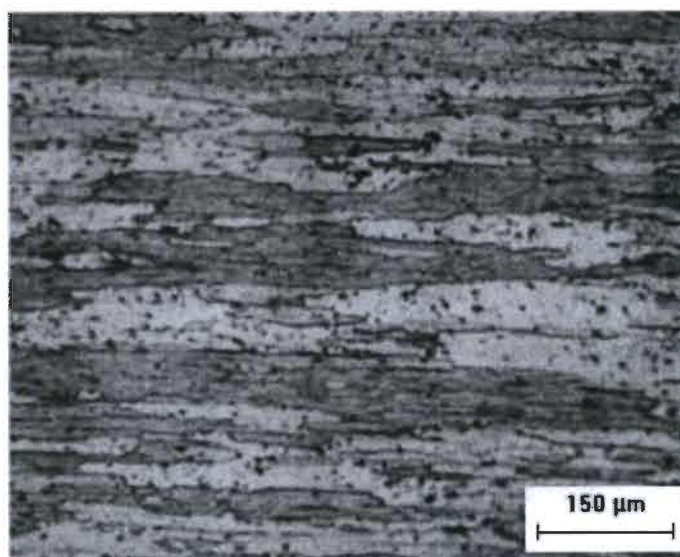


Figura 2.3 Granos ligeramente alargados y porosidad en la zona soldada mediante proceso GTAW (14).

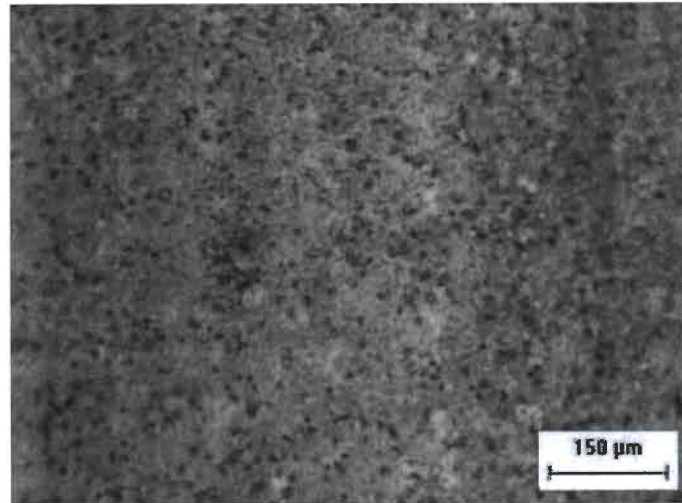


Figura 2.4 Microestructura del metal soldado mediante el proceso GTAW que revela la presencia de partículas esféricas de MgZn (negro) y pequeñas formaciones de partículas de FeAl<sub>3</sub> (14)

Las uniones elaboradas por el proceso GMAW presentan una menor resistencia comparadas con las pruebas hechas con el proceso GTAW, la dureza es menor en la región del metal de soldadura (MS) en comparación con las regiones de la zona afectada por el calor (ZAC) y el metal base (MB). La mayor dureza presentada en la zona afectada por el calor fue de 157 HV mediante este proceso. Así como la formación de granos equiaxiales en la zona de soldadura, los cuales se distribuyeron uniformemente en la microestructura (14).

Otro tema relacionado es la investigación de los investigadores. M. Temmar, M. Hadji, T. Sahraoui fue el efecto del tratamiento de envejecimiento pos soldadura en las propiedades mecánicas de uniones de aleación de aluminio A7075 por proceso TIG. Realizaron varias pruebas variando los parámetros, y empleando como gas de protección argón.



El tratamiento pos soldadura consistió en una permanencia de 10 horas a una temperatura de 140°C en un horno de atmósfera controlada. Para la evaluación de las propiedades mecánicas hicieron uso de pruebas de microdureza así como de tensión. Para el caso de la dureza utilizaron una carga de 500 g y para las pruebas de tensión, los estándares para las probetas fueron determinados mediante la norma ASTM (B-557M).

La Figura 2.5 muestra una micrografía en la cual se ve una formación de granos equiaxiales en la zona de fusión, esto mediante el uso de microscopía óptica. En el inciso a se observa disolución de precipitados y engrosamiento de grano en la zona sometida a la temperatura máxima. En el inciso (b) se observa la estructura granular en la zona afectada por el calor y la formación de nuevos granos más refinados atribuidos a la entrada de calor durante el proceso de unión.

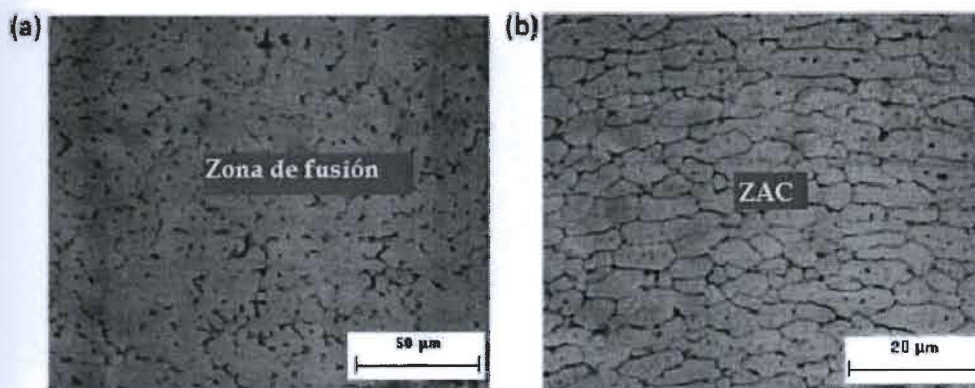


Figura 2.5 Micrografías A7075-T6 a) zona de fusión b) zona afectada por el calor (15)

En la Figura 2.7 se observan las micrografías del material con y sin tratamiento térmico. El ensayo de dureza, muestra valores para el centro de la soldadura de 84 HV y 95 HV en la zona afectada por el calor. En la Figura 2.6, se puede observar el perfil cerca de la zona afectada por el calor, en la zona de fusión hubo pérdida de dureza. Esto por fases dendríticas segregadas. En el caso de las probetas con tratamiento de envejecido la dureza de la zona de fusión y la zona afectada por el calor incrementaron en comparación con las

probetas sin tratamiento, pero cabe mencionar que la diferencia no fue muy significativa.

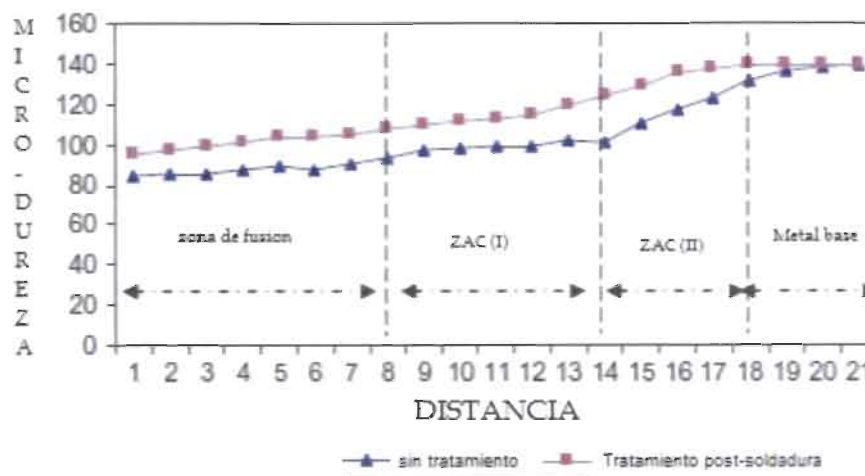


Figura 2.6 Perfil de microdurezas (HV) (15).

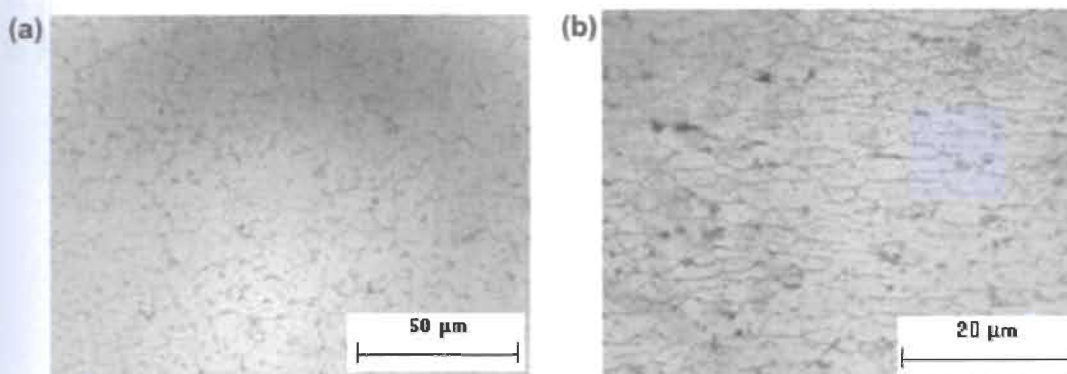


Figura 2.7 Micrografías metal base a) sin tratamiento y b) con tratamiento post soldadura (15).

Para la parte de las pruebas de tensión, los valores del límite elástico y el último esfuerzo a la tensión del metal base, los valores son 404 y 508 MPa respectivamente. Los valores del límite y último esfuerzo a la tensión de las probetas unidas mediante TIG son 200 y 248 indicando que hubo un 50% de disminución en los valores antes mencionados, esto en las probetas que no tuvieron tratamiento post soldadura.

Los bajos valores de resistencia a la tensión se deben o atribuyeron a la formación de micro-grietas durante el proceso de soldadura, esta disminución se dio en las probetas a las que no se les aplicó tratamiento post-soldadura.

Otra conclusión importante a la que llegaron fue que el tratamiento de envejecido post soldadura que se aplicó a las probetas tuvo incremento en el valor de resistencia a la tensión.

## 2.4 Proceso de soldadura GTAW (15)

Es un proceso de unión que emplea un arco eléctrico entre un electrodo no consumible de tungsteno y el charco de soldadura. El proceso se utiliza con un gas protección. En este proceso, la adición de metal de aporte es opcional, este proceso en la actualidad se ha vuelto de gran importancia a nivel industrial para la producción de soldaduras de gran calidad y bajos costos de los equipos. En la Figura 2.8 se muestra el principio del proceso GTAW.

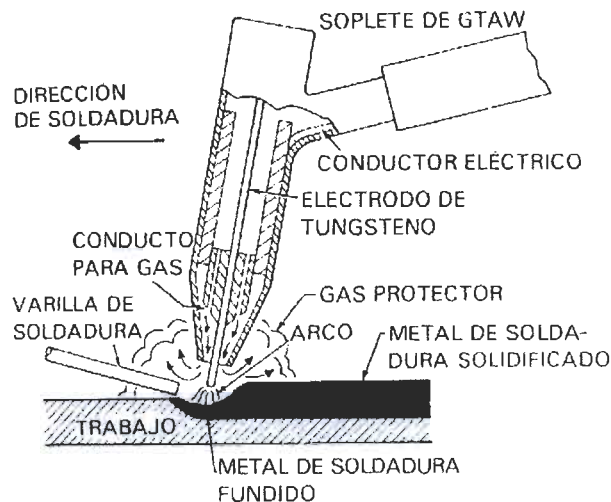


Figura 2.8 Proceso de soldadura GTAW (15).

### 2.4.1 Descripción del proceso

El proceso emplea un electrodo de tungsteno que no se consume sostenido en un soplete, el soplete alimenta gas protector que es el encargado de proteger al electrodo, al charco de soldadura y al metal base de contaminación por parte de la atmósfera. El arco se produce por el gas protector ionizado que se establece entre la punta del electrodo y el material de trabajo. El calor generado es el encargado de fundir el metal base, cuando el arco se establece, la pistola se mueve a lo largo de la unión, si se emplea metal de aporte, éste se alimenta por el borde delantero para llenar la junta. La Figura 2.9 se muestran los principales componentes del proceso GTAW.

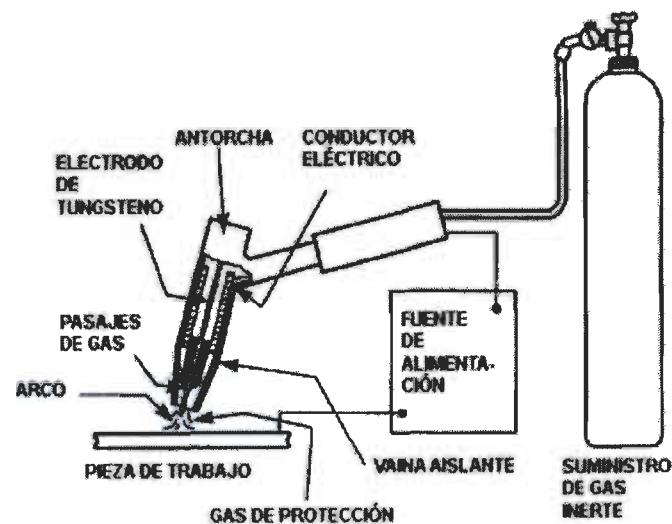


Figura 2.9 Equipo proceso de soldadura GTAW (15).

## 2.4.2 Ventajas y desventajas del proceso

Ventajas	Desventajas
Al utilizar este proceso las uniones son de muy buena calidad y generalmente están libres de defectos.	Las tasas de deposición se consideran bajas comparado con otros procesos de electrodo consumible.
Los metales y uniones no tienen salpicaduras que ocurren con otros procesos de unión por arco.	El soldador requiere de un mayor grado de habilidad y coordinación para manejar el proceso y llevar a cabo la unión.
Se puede utilizar sin material de aporte (autógena) o con material de aporte, según sea la aplicación.	La difícil protección debida de la zona de soldadura en lugares con corrientes de aire.
Permite controlar muy precisamente las variables de soldadura.	
Se puede utilizar para unir la mayoría de los metales también en uniones disímiles.	
La fuente de calor y adición de metal de aporte se pueden controlar de forma independiente.	

## 2.4.3 Variables del proceso (15)

Las principales variables del proceso de GTAW son el voltaje del arco (longitud del arco), la corriente de soldadura, la velocidad de recorrido y el gas protector.

### 2.4.3.1 Corriente del arco

La corriente del arco controla la penetración de la soldadura, en este proceso se puede usar con corriente continua y corriente alterna, y la elección depende en buena parte del metal que se va a soldar.

La corriente continua con el electrodo negativo ofrece las ventajas de penetración profunda y velocidades de soldadura altas, mientras que la corriente alterna tiene una acción de limpieza catódica (chisporroteo) que

elimina óxidos refractarios de las superficies de unión de aluminio y magnesio, lo que permite obtener soldaduras de muy buena calidad.

#### *2.4.3.2 Voltaje del arco*

El voltaje es una variable muy dependiente, el cual se ve afectado por la corriente del arco, la forma de la punta del electrodo de tungsteno, la distancia entre éste último y la mesa de trabajo y por el tipo de gas protector.

El voltaje del arco puede servir para controlar la longitud del mismo, ésta última es muy importante en este proceso porque afecta la anchura del charco de soldadura, ya que la longitud de arco recomendada es la más corta posible.

#### *2.4.3.3 Velocidad de recorrido*

La velocidad de recorrido afecta tanto la anchura como la penetración de una soldadura por arco de tungsteno y gas.

La velocidad se podría considerar una variable dependiente, ya que lo que se pretende es obtener una soldadura con la calidad y uniformidad deseada en las mejores condiciones posibles con la combinación de las demás variables.

### **2.4.4 Equipo (15)**

El equipo para soldadura GTAW está compuesto de sopletes, electrodos y fuentes de potencia.

#### *2.4.4.1 Sopletes*

Los sopletes de GTAW son los encargados de proteger la zona del arco. Sostienen el electrodo de tungsteno que transporta la corriente de soldadura. Existen dos tipos de sopletes, los enfriados por agua y los enfriados por gas. Los sopletes enfriados por agua eliminan el calor mediante un flujo continuo a

través de conductos internos, estos sopletes están diseñados para usarse con corrientes más altas que los sopletes con gas. Los sopletes enfriados por gas eliminan el calor por medio del flujo de gas protector. Este tipo de sopletes está limitado a una corriente de 200 amperes.

#### 2.4.4.2 Electrodo

Los electrodos de tungsteno son no consumibles, la función del tungsteno es servir como terminal eléctrica del arco que proporciona el calor necesario para soldar.

La clasificación de los electrodos de tungsteno se da de acuerdo a su composición química, estos se identifican por un código de colores según el elemento de aleación, como se muestra en la Tabla 2.8

Tabla 2.8 Clasificación de electrodos de tungsteno (15).

Clasificación AWS	Color	Elemento de aleación	Oxido de aleación
EWP	Verde	-	-
EWCe-2	Anaranjado	Cerio	CeO <sub>2</sub>
EWLa-1	Negro	Lantano	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
EWTh-1	Amarillo	Torio	ThO <sub>2</sub>
EWrh-2	Rojo	Torio	ThO <sub>2</sub>
EWZr-1	Marrón	Zirconio	ZrO <sub>2</sub>
EWG	Gris	No especifica	-

#### 2.4.4.3 Fuentes de potencia

Las fuentes de potencia utilizadas para el proceso GTAW pueden ser corriente alterna o corriente continua. Las más recomendadas para el proceso GTAW son aquellas de corriente constante.

Cuando se usa corriente directa, el electrodo de tungsteno puede conectarse en las 2 terminales ya sea a la positiva o a la negativa. Con la polaridad negativa, los electrodos fluyen del electrodo a la mesa de trabajo y los

iones positivos se transfieren de la mesa de trabajo al electrodo (CCEN). Cuando el electrodo es positivo, el flujo de electrones y iones positivos se invierten (CCEP) (polaridad inversa).

La corriente alterna combina la acción de limpieza de la mesa de trabajo con polaridad inversa y la penetración profunda que caracteriza a la polaridad directa. La soldadura con corriente alterna se compara con la corriente directa tanto en electrodo negativo y positivo como se puede ver en la Figura 2.10 (15).

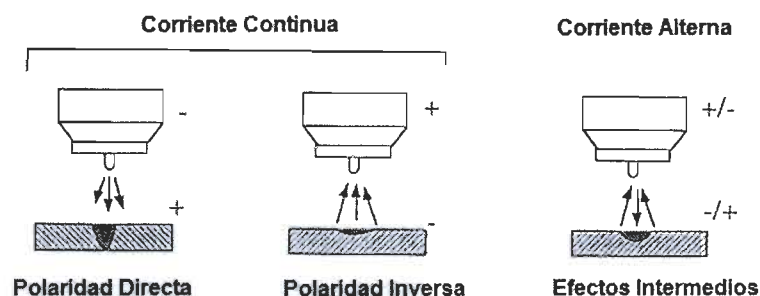


Figura 2.10 Características de tipos de corriente para soldadura GTAW (15).

#### 2.4.5 Gases de protección (15)

Durante el proceso de soldadura, el soplete es el encargado de dirigir el gas protector al arco y el charco de soldadura con el fin de proteger el electrodo y el metal fundido de contaminación de gas de la atmósfera, se puede utilizar un gas de respaldo, este sirve como una barrera que protege el arco del aire, principal causante de oxidación. No reacciona con el metal ni influye en las propiedades del fundido, además por ser inerte es más estable, reduce el agrietamiento de la raíz y la porosidad de la soldadura, hay diferentes gases de protección, como lo son el argón, helio, mezclas entre ellos, entre otros.



#### 2.4.5.1 Argón (16)

El argón proporciona una excelente estabilidad de arco. Se usa normalmente mezclado con otros gases como oxígeno, dióxido de carbono y helio.

Es utilizado en metales no férricos, como aleaciones base níquel, cobre, aluminio o magnesio, y también en aceros inoxidable y de baja aleación, además en metales reactivos como titanio y circonio.

Este gas es ampliamente usado, esto porque provoca una menor penetración, es silencioso y crea un arco uniforme, además de un menor costo y disponibilidad. La menor penetración es de gran utilidad en materiales delgados ya que reduce la tendencia a una perforación excesiva.

#### 2.4.5.2 Helio (16)

Es un gas de elevada conductividad, a la vez que genera poca penetración de soldeo y cordones anchos. Produce un arco plasma más uniformemente y disperso. Este gas produce un arco más caliente que hace que sea benéfico para soldar espesores gruesos y metales de cobre, aluminio y magnesio que tienen una conductividad térmica alta; generalmente da cordones de soldadura más ancha y penetración buena que el argón.

#### 2.4.5.3 Mezcla de argón e hidrógeno (16)

Esta mezcla argón-hidrógeno es utilizadas en casos especiales, se emplea en soldadura mecanizada en tubos de acero inoxidable de espesores delgados. Este tipo de mezcla solo se puede emplear en aceros inoxidables, cobre-níquel y aleaciones de níquel.

## **2.4.6 Metal de aporte (16)**

La elección del material de aporte para cualquier aplicación se tienen que verificar la compatibilidad metalúrgica, ya que se pretende que sea similar más no necesariamente idéntico al metal que se va a unir, tratando de igualar las propiedades del metal base. Otros factores para la elección del aporte serían la aplicación y el costo. El material de aporte debe adecuarse tanto a la aleación que se va a unir como a la aplicación que se va destinada.

En la especificación 5.10 de la AWS varillas y electrodos desnudos para soldadura de aluminio y aleaciones de aluminio, se muestran las propiedades mecánicas, composición química así como las condiciones en que deben probarse los metales de aporte.

## **2.4.7 Calidad de la soldadura (15)**

### *2.4.7.1 Discontinuidades y defectos*

Las discontinuidades son interrupciones en la estructura típica de un ensamble soldado, y pueden ocurrir en el metal base, en el metal de soldadura o en las zonas afectadas por el calor. Las discontinuidades según los códigos y especificaciones se clasifican como defectos y se tienen que eliminar ya que pueden ser perjudiciales en el rendimiento.

### *2.4.7.2 Inclusiones de tungsteno*

La principal discontinuidad que se presenta al realizar uniones mediante este proceso, son las inclusiones de tungsteno. Las principales causas por las que ocurre eso son: el contacto de la punta del electrodo con el charco de soldadura o contacto del metal de aporte con la punta caliente del electrodo, entre otras.

### 2.4.7.3 Falta de protección

Las inclusiones de tungsteno, porosidad, inclusiones de óxidos, fusión incompleta y agrietamiento son las discontinuidades que se relacionan con la pérdida del escudo de protección de gas. El grado con el que ocurren, está relacionado con las características del material que se suelda. En el caso del aluminio puede disminuir sus propiedades si se llega a perder la protección de gas.

## 2.5 Soldabilidad de las aleaciones de aluminio (17)

La soldabilidad del aluminio y sus aleaciones puede considerarse intermedia. Para llevar a cabo la unión, se deben considerar muchos factores, las cuales están en función de sus propiedades físicas, químicas y metalúrgicas, así como algunas otras que dependerán exclusivamente de la técnica y proceso de soldadura que se esté utilizando.

Una dificultad que se presenta en el proceso de soldadura del aluminio y sus aleaciones comienzan con la capa de óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) que se forma de manera natural sobre la superficie del metal y funde por encima de los  $2000^{\circ}C$ . Dicha capa de  $Al_2O_3$  impide la estabilidad del arco eléctrico entre el electrodo y el metal base, por lo tanto antes de iniciar el proceso, debe realizarse una limpieza en la unión.

Otra dificultad se presenta en la selección correcta del tipo de corriente y polaridad, donde se recomienda utilizar siempre corriente directa con polaridad inversa (CDEN), es decir, el electrodo conectado al polo positivo de la fuente y la pieza de trabajo al polo negativo. Al utilizar la polaridad inversa, se logra eliminar la capa de óxido de aluminio y por tanto se logra una mejor aplicación del proceso de soldadura.

### **2.5.1 Efectos caloríficos en el proceso**

Tanto el aluminio como sus aleaciones presentan un bajo punto de fusión pero un alto calor específico, un calor latente de fusión y una alta conductividad térmica comparado con el acero; sin embargo, una gran cantidad de calor es requerido en un corto tiempo para fundir el aluminio y sus aleaciones en comparación con el acero.

### **2.5.2 Película de óxido resistente**

El aluminio y sus aleaciones producen una película de óxido muy resistente en su superficie cuando son calentados a altas temperaturas y fundidos, a menos que la superficie sea protegida con un gas inerte. Este óxido evita la unión entre el metal base y el material de aporte.

### **2.5.3 Aumento de porosidad en proceso GTAW**

El proceso de soldadura en material de aluminio y sus aleaciones es más susceptible de generar porosidad al momento de realizar la aplicación del cordón de soldadura, el principal motivo es el hidrógeno en el metal de aporte.

Existe una gran variedad de materiales de aporte para procesos GTAW siendo las características químicas y mecánicas dos de los criterios principales para seleccionar el material de aporte más adecuado. Existen varios aspectos a considerar para la selección del material empleado para soldar aluminio y sus aleaciones, dentro de estos aspectos debemos de considerar la susceptibilidad a las fracturas, resistencia a la tensión de la junta, ductilidad del material aplicado, resistencia a la corrosión y el color de la unión material de aporte y el metal base después de un tratamiento de oxidación anódica.

#### 2.5.4 Susceptibilidad a fracturas en caliente

Las fracturas en caliente son el tipo más frecuente de fracturas en las soldaduras del aluminio y de sus aleaciones, esto puede ocurrir en la soldadura a temperaturas cercanas al punto de sólidos del metal base y del metal de aporte durante el ciclo de enfriamiento si el procedimiento de aplicación de soldadura es inadecuado.

V. Balasubramanian, V. Ravisankar y G. Madhusudhan Reddy realizaron un estudio en el año de 2007 en el cual investigaron el efecto de la corriente pulsada y tratamiento post soldadura de envejecimiento así como evaluación de propiedades mecánicas como dureza y tensión en aleaciones de aluminio.

Para llevar a cabo la investigación, el material utilizado fue una aleación de aluminio A7075, la cual fue soldada por 2 procesos: GMAW y GTAW con un electrodo ER-5356 y como gas de protección se utilizó argón de alta pureza; así como los parámetros que se emplearon, los cuales están representados en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Parámetros utilizados

Proceso	GMAW	GTAW
Voltaje (V)	30	24
Corriente (A)	200	150
Velocidad de Avance (mm/min)	150	120

Llevado a cabo, el estudio se dividió en 2 partes, en probetas soldadas y otras fueron sometidas a tratamiento de pos soldadura. El tratamiento consistió en introducir la probeta soldada en un horno a una temperatura controlada de 125°C durante 24 horas. Para la evaluación de la microdureza se utilizó una carga de 0.5 kg. En la Figura 2.11 se puede apreciar cómo fue la preparación para llevar a cabo la unión de las probetas.

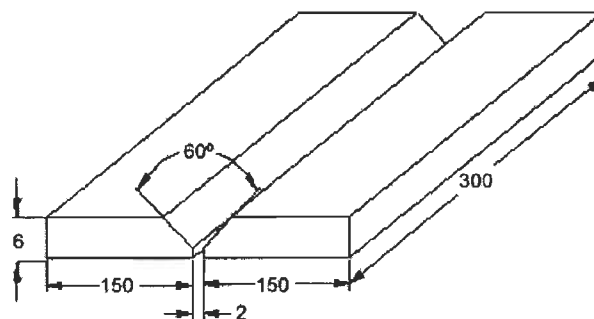


Figura 2.11 Preparación de probetas de soldadura.

En cuanto a resultados de microdureza se obtuvo que las probetas soldadas y que no fueron sometidas a tratamiento post soldadura fueron las siguientes: para la probeta unida mediante el proceso GTAW se obtuvo una dureza de 85 HV, mientras que la soldada mediante el proceso GMAW se obtuvo una dureza de 70 HV, los ensayos de microdureza fueron practicados en la zona de fusión.

El proceso de pos soldadura tuvo efectos significativos en las probetas, en el que tuvo un mejor efecto fue en las probetas que fueron unidas mediante GTAW, el valor de la dureza para este proceso fue de 105 HV mientras que para el proceso GMAW fue de 85 HV, al igual que en las probetas sin tratamiento térmico, los ensayos de microdureza fueron practicados en la zona de fusión (cordón de soldadura).

Mediante la corriente pulsada hubo reducción del 50% del tamaño de grano, hubo formación de precipitados finos en las probetas unidas mediante el proceso GTAW, mientras que en las probetas unidas mediante el proceso GMAW hubo precipitados más densos y se presentaron en mayor cantidad comparados con el proceso GTAW.

En cuanto a las pruebas de tensión, éstas se llevaron a cabo mediante la norma ASTM-E8, para la preparación de las probetas para dicha prueba se aprecia en la Figura 2.12.

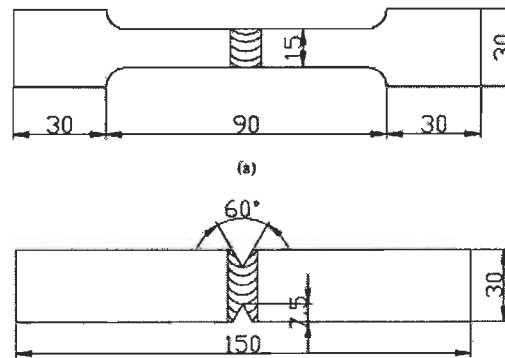


Figura 2.12 Probetas para prueba de tensión.

Como resultado, los investigadores concluyen que las probetas de tensión fracturaron o fallaron en la parte de la soldadura.

Los investigadores según los datos obtenidos mediante las pruebas, llegaron a la conclusión de que la corriente pulsada tiene una mejor influencia en las propiedades mecánicas y metalúrgicas, esto debido al refinamiento de grano en la zona de fusión, esto incrementa propiedades como dureza y tensión.

El tratamiento pos soldadura incrementó en un 15-20% la dureza además de que produjo granos finos, así como el efecto de un simple tratamiento post soldadura causó notables cambios en la formación de precipitados y su distribución.

## 2.6 Metalurgia de la soldadura

### 2.6.1 Diagramas de fase de equilibrio (17)

Los diagramas de fase de equilibrio son una herramienta esencial en la comprensión de la microestructura. Para las aleaciones de aluminio, los diagramas de fase se utilizan para determinar las temperaturas de solidificación y fusión así como las fases de equilibrio que se forman y sus temperaturas de disolución. Además de la determinación de temperaturas apropiadas para

tratamientos térmicos y fundición, los diagramas de fase se utilizan para determinar los niveles máximos de adiciones de elementos secundarios y de ciertos elementos para evitar la cristalización de las partículas primarias gruesas. En la Figura 2.13 se puede observar el diagrama ternario de la aleación Al-Mg-Si (serie 6XXX) y en la Figura 2.14 el diagrama binario Al-Zn (serie 7XXX) en los cuales muestra las principales reacciones que ocurren, así como las temperaturas a las que ocurren dichas reacciones.

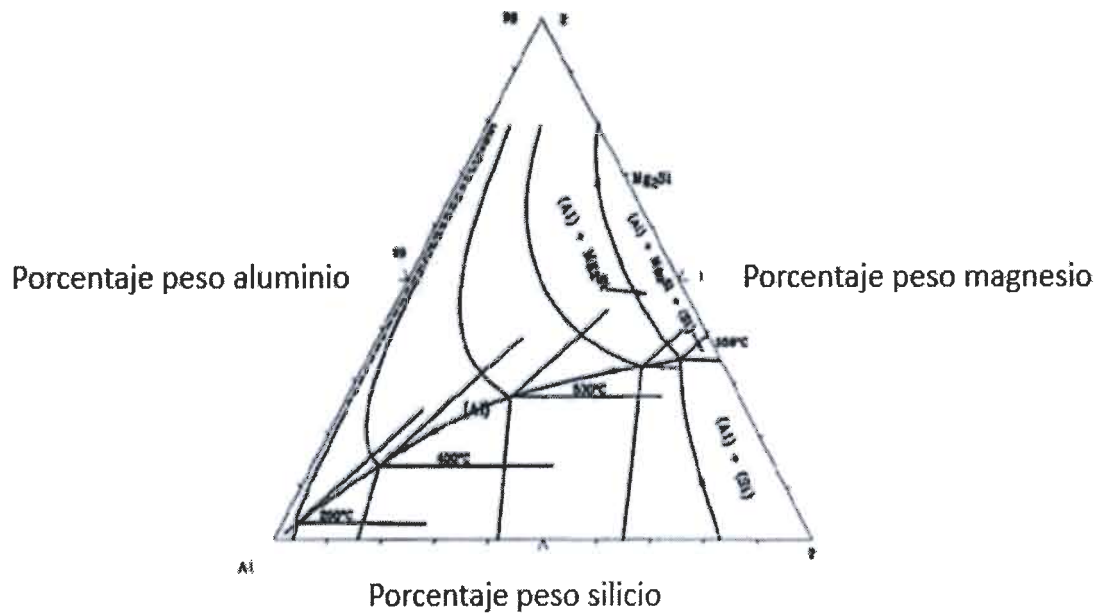


Figura 2.13 Diagrama ternario Al-Mg-Si (18).



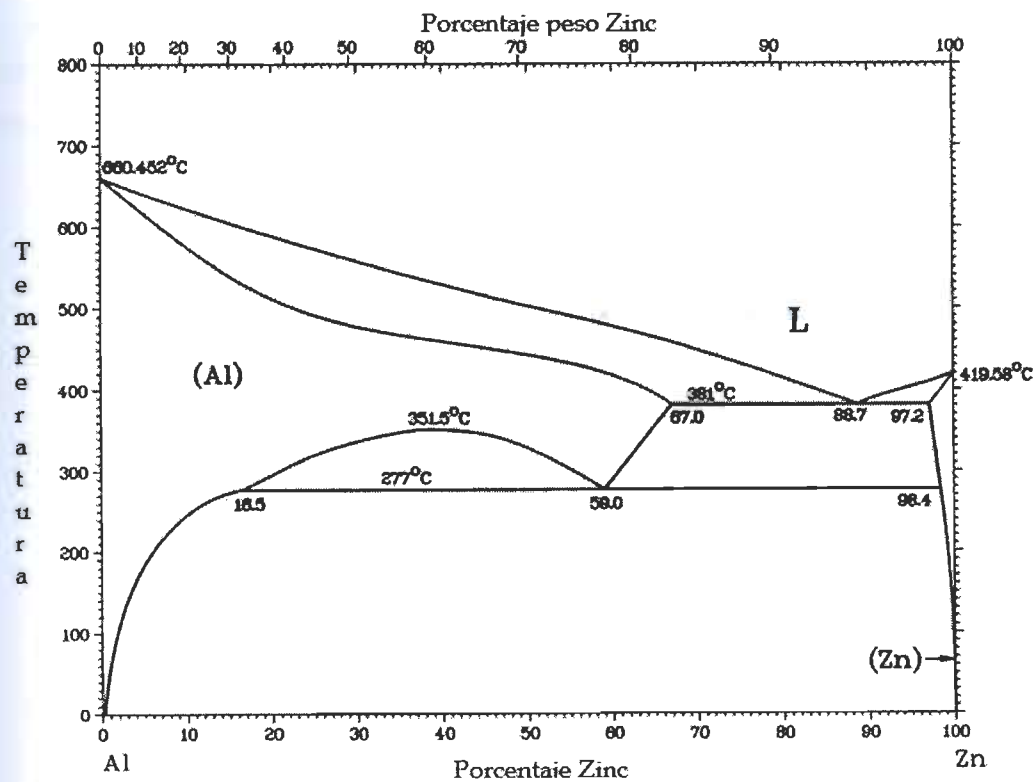


Figura 2.14 Diagrama binario Al-Zn (18)

## 2.6.2 Inclusiones (óxidos) (17)

Estos son típicamente óxidos de aluminio  $Al_2O_3$ , magnesio,  $MgO$ , y el óxido mixto,  $MgAl_2O_4$ . Los defectos de capas de óxido pueden ser tan pequeños como  $10^{-6}$  m de ancho, con un espesor de película tan bajo como  $10^{-8}$  m.

El efecto nocivo de los defectos causados por el óxido podría llegar a aumentar el tiempo del tratamiento térmico de la pieza de aluminio a la condición de máximo envejecido y posteriormente aumentar la fuerza a expensas de la ductilidad.

La presencia de defectos en la película de óxido disminuye la vida de fatiga de componentes de aluminio en varios órdenes de magnitud. En la Figura 2.15 se puede observar una película de óxido en una aleación de aluminio.



Figura 2.15 Película de óxido en aleación de Al (17).

### 2.6.3 Porosidad (17).

La porosidad reduce la ductilidad e incrementa la susceptibilidad de iniciación de fracturas de fatiga. La porosidad puede surgir ya sea por contracción durante la solidificación o por hidrógeno. Los poros por hidrógeno son usualmente de forma esférica, mientras que la porosidad de contracción es más alargada y por consecuencia afectan más las propiedades mecánicas que los poros de hidrógeno.

El control de hidrógeno durante la solidificación es extremadamente importante debido a que la solubilidad del hidrógeno disminuye hasta 10 veces en el aluminio cuando se solidifica. La porosidad por inducción de hidrógeno también puede ocurrir en los productos de aluminio sólido cuando se calientan a altas temperaturas en ambientes húmedos.

Siempre que el contenido de porosidad sea lo suficientemente baja, la mayor parte de la porosidad puede reducirse por tratamientos termomecánicos. La presión isostática puede ser utilizada para cerrar los poros en piezas de fundición, forja y extrusión convencional y son eficaces en la curación de la porosidad de lingotes. En piezas de fundición de aluminio, se emplean procesos de presión isostática para dar los mejores resultados y una disminución de defectos en la película de óxido durante el proceso de colada

La porosidad en productos laminados gruesos es particularmente difícil de cerrar debido a que las tensiones de tracción pueden presentarse durante la laminación de la placa gruesa. Al aplicar una laminación adicional a la placa más delgada los poros eventualmente son eliminados, en la Figura 2.16 se puede observar la porosidad en una aleación de Al-Si.



Figura 2.16 Porosidad en las aleaciones de fundición de Al-Si (17).

#### **2.6.4 Constituyentes (17).**

Estos son compuestos intermetálicos que se forman por la reacción eutéctica durante la solidificación, o esencialmente de silicio puro que se forma durante la solidificación hipoeutéctica en aleaciones Al-Si más otro elemento de aleación.

Partículas constituyentes tienen una interfaz no coherente con la matriz, y son demasiado gruesas para interferir con los movimientos de los límites de grano. En consecuencia, no proporcionan ningún aumento de la fuerza.

Estos constituyentes son generalmente perjudiciales para la tenacidad a la fractura y resistencia a la fatiga de aumento de alta resistencia. Las partículas fracturan a tensiones de deformación plástica relativamente baja y proporcionan sitios de baja energía para la iniciación y el crecimiento de grietas.

#### **2.6.5 Precipitados (17).**

Estas partículas se pueden formar durante cualquier operación térmica por debajo del solvus, todos los precipitados se disuelven durante el tratamiento térmico de solución. Se pueden formar precipitados dependiendo de la velocidad de enfriamiento y la aleación durante el enfriamiento desde la temperatura de tratamiento térmico en disolución a los límites de grano y subgranos y en las interfaces del material.

Los precipitados gruesos no ayudan con el endurecimiento por envejecimiento, y son causantes de la reducción de propiedades como la ductilidad y la tenacidad a la fractura. Después del enfriamiento, las zonas de Guinier Preston (GP) se forman a temperatura ambiente (envejecido natural). Son aglomerados de átomos de los elementos principales, el límite coherente entre las zonas de GP y la matriz del material.

En las aleaciones de aluminio el efecto térmico de la soldadura es el causante de la disminución de las propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor (ZAC) provocando una disminución de dureza y pérdida de resistencia y propiedades. Estos problemas están directamente relacionados con la buena o mala calidad de las uniones, con la aplicación de la soldadura, sobretodo en la aparición de poros ya sea por una mala preparación o protección.

Lo desarrollado por los investigadores Gómez de Salazar, Ureña y colaboradores, fue el estudio de aleaciones de la serie 6XXX y 7XXX, hicieron análisis metalográficos mediante microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (MEB), con el fin de evaluar cómo varía la microestructura debido al proceso de soldadura (16). Los parámetros que emplearon se muestran en la tabla 2.10.

Tabla 2.10 Parámetros de soldadura procesos TIG y MIG (16)

Materiales	Proceso	V (V)	I (A)	Vel. (mm/min)
AA6061	TIG	16	190	150
		25	160	150
	MIG	23.5	150	150
AA7020		16	200	150
	TIG	17	160	150
		17	160	150
	MIG	23.8	156	150

En la Figura 2.17 se presentan en ambas aleaciones fases interdendríticas con precipitados del tipo  $AlFeSiCu$  en el espaciado interdendrítico. En la Figura 2.17 (a) se pueden observar dichos precipitados en la aleación A6061 y en el inciso (b) se observa un incremento en el tamaño de grano y eutécticos ternarios de la misma aleación.

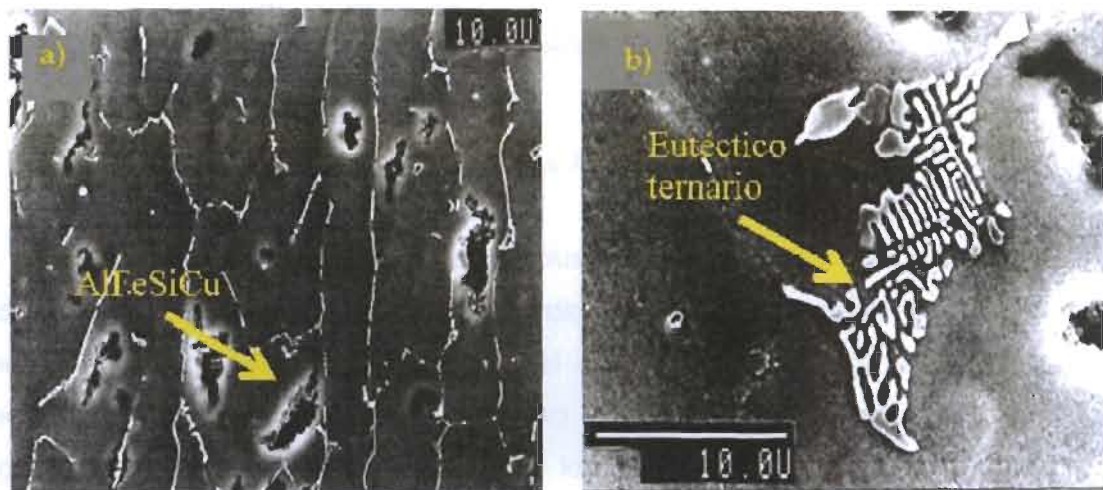


Figura 2.17 a) Fases interdendríticas en AA6061 en zona de fusión. b) Eutécticos ternarios en ZAC de AA6061 (16)

Para comprobar las variaciones de dureza después de la soldadura se practicó microdureza Vickers con una carga de 0.5 kg. Los resultados obtenidos muestran variación de dureza tanto en ZAC como en el metal base. Se cree que la pérdida de dureza en el metal base y la zona afectada por el calor, es la

causa principal del fallo en las aleaciones de aluminio, además de que la fase endurecedora como lo es la  $\beta'$  se pierde por disolución en la matriz, es por esto la pérdida de sus propiedades mecánicas. Además de esto el aumento de tamaño de grano lleva al reblandecimiento. Los perfiles de dureza comprueban que hay una pérdida de dureza se puede observar en la Figura 2.18 (16).

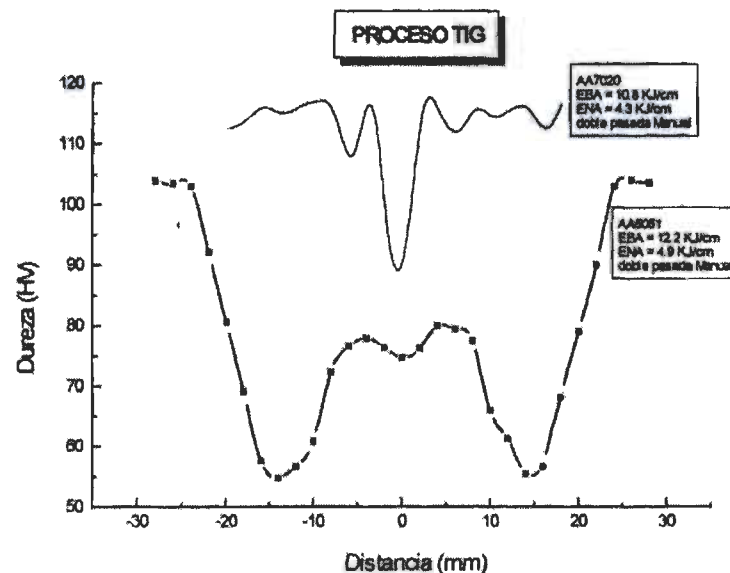


Figura 2.18 Perfiles de dureza de aleaciones A6061 y A7020 proceso GTAW (16).

Gómez y compañía llegaron a las conclusiones de que para las pruebas de soldadura empleadas, no se originan pérdida de elementos aleantes ni en el metal base ni en la zona afectada por el calor, por lo tanto los parámetros fueron elegidos correctamente, además no se han presentado fenómenos de agrietamiento ni porosidad u oxidación, lo cual es bueno ya que no hay presencia de defectos solo se origina un ablandamiento en la zona afectada por el calor, pero es recuperable por tratamiento térmico de post soldadura (16).

## **2.7 Técnicas de caracterización**

### **2.7.1 Microscopía óptica.**

El funcionamiento del microscopio óptico se basa en un sistema de lentes y el más común hoy en día es el compuesto. Este microscopio combina al menos dos juegos de lentes, el objetivo y el ocular.

El funcionamiento del objetivo podría asimilarse al funcionamiento de la lente de un proyector de cine y la forma en la que se proyecta la imagen sobre la pantalla.

La imagen que proyecta el objetivo se forma en el aire entre el objetivo y el ocular. Esta imagen se conoce como imagen primaria o imagen aérea. Esta imagen primaria alcanza el siguiente juego de lentes, el ocular, que actúa como una lupa ampliando la imagen primaria.

En el funcionamiento del microscopio óptico se producen dos ampliaciones de la imagen, una en el objetivo y otra en el ocular, llamadas ampliación primaria y ampliación secundaria respectivamente. La multiplicación de ambas ampliaciones da la capacidad de resolución total del microscopio de aumento. El objetivo siempre produce un aumento mucho mayor que el ocular. Además, el ocular suele ser fijo y los objetivos intercambiables para conseguir diferentes aumentos según la necesidad (18).

### **2.7.2 Microscopio electrónico de barrido (19).**

Un microscopio electrónico de barrido crea una imagen ampliada de la superficie de un objeto. No es necesario cortar el objeto en capas para observarlo con un microscopio electrónico de barrido (MEB) sino que puede colocarse en el microscopio con muy pocos preparativos. El MEB explora la superficie de la imagen punto por punto. Su funcionamiento se basa en recorrer



la muestra con un haz muy concentrado de electrones, de forma parecida al barrido de un haz de electrones por la pantalla de una televisión. Los electrones del haz pueden dispersarse de la muestra o provocar la aparición de electrones secundarios. Los electrones perdidos y los secundarios son recogidos y contados por un dispositivo electrónico situado a los lados del espécimen. Cada punto leído de la muestra corresponde a un píxel en un monitor de televisión. Cuanto mayor sea el número de electrones contados por el dispositivo, mayor será el brillo del píxel en la pantalla. A medida que el haz de electrones barre la muestra, se presenta toda la imagen de la misma en el monitor. Los microscopios electrónicos de barrido pueden ampliar los objetos 200,000 veces o más.

## 2.8 Propiedades mecánicas (20).

Para hacer la elección correcta de algún material, es necesario conocer las propiedades mecánicas de éste para saber si el material será útil para la aplicación que se le destine al mismo. Para ello las propiedades o los valores de estas propiedades se obtienen mediante pruebas y ensayos. Una vez que se conocen los valores o resultados de estas pruebas, es posible hacer la elección correcta del material.

### 2.8.1 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión mide la resistencia de un material a una carga constante o gradualmente aplicada. Ésta se coloca en la máquina de pruebas y se le aplica una carga. Se utiliza un extensómetro, esto para medir el alargamiento del material causado por la carga.

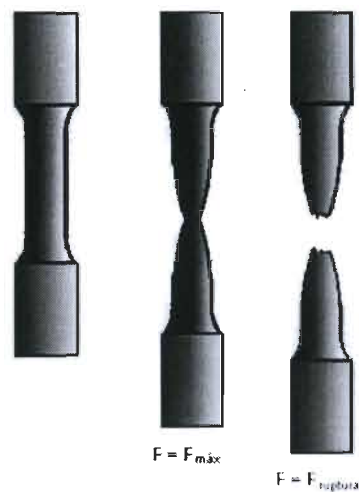


Figura 2.19 Probeta de tensión al inicio, carga máxima y ruptura

## 2.8.2 Ensayo de dureza

El ensayo de dureza mide la resistencia de la superficie de un material a la penetración por un objeto duro. Existen diversas pruebas de dureza, las más comunes son Brinell, y Rockwell. El ensayo Vickers es una prueba de microdureza.

La dureza está muy relacionada con la resistencia al desgaste ya que si se requiere un material que está este expuesto al desgaste y al impacto, se requiere de un material duro. Las aleaciones de aluminio se considera que tienen una dureza similar a la de algunos aceros, es por eso que actualmente su uso va en aumento.

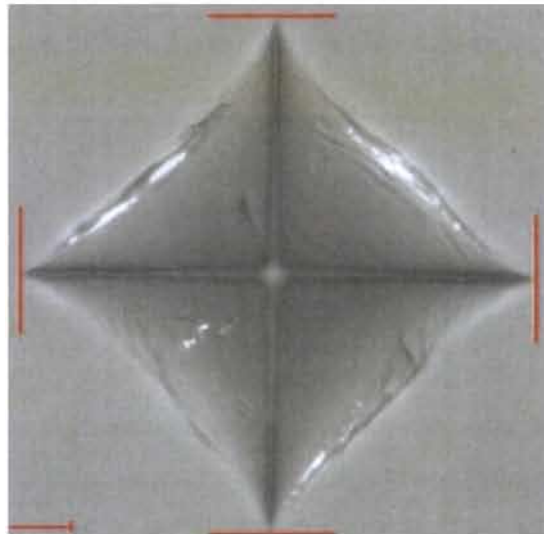


Figura 2.20 Huella de indentación prueba de microdureza

## **CAPÍTULO III.**

# **DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA**

En la actualidad la demanda del uso del aluminio ha ido en aumento, esto gracias a la versatilidad de productos que se pueden producir con éste. El aluminio puro tiene muy poca aplicación, sin embargo al agregarle elementos aleantes como magnesio, cobre, zinc, silicio mejoran potencialmente sus propiedades, logrando esto, una amplia aplicación en diversas áreas como lo es la aeronáutica, estructural y automotriz, según sea su composición química, tratamientos y procesos al que sean sometidos.

El principal interés es que el material a unir conserve las propiedades químicas y físicas del material base o sean lo más parecidas posible, es por eso que al momento de llevar a cabo la unión hay que tener en cuenta los parámetros, material a unir y proceso de unión, esto para tratar de evitar defectos y diferencias en sus propiedades mecánicas como la dureza, tensión, etc.

Los procesos más convencionales o utilizados para unir estas aleaciones de aluminio, son los procesos GMAW y GTAW, esto por la protección del gas que previenen diferentes defectos o problemas al momento de llevar a cabo la unión como corrosión, así como inclusiones de gas entre otros.

Los procesos de unión son de los pasos de mayor importancia esto debido a todos los parámetros y propiedades que se deben tener en cuenta como sus propiedades mecánicas, metalúrgicas y el costo del proceso.

Se considera que aleaciones de aluminio como la serie 6XXX y 7XXX tienen una buena soldabilidad, para lograr a cabo una excelente unión de soldadura, requiere que se cumplan una serie de factores como lo son los parámetros de soldadura, tales como la corriente, gas de protección, así como el voltaje y el electrodo. Pueden afectar o influir directamente tanto en la penetración de la soldadura como en las propiedades mecánicas y microestructurales de la zona donde se lleve a cabo la unión.

Si se aumenta la corriente, la temperatura se elevará provocando más penetración de la requerida y podrá generar defectos por el exceso de calor. Por otro lado, si la corriente es insuficiente, el calor de entrada no será suficiente para lograr una penetración completa provocando faltas de fusión y cordones de mala calidad.

El gas de protección tiene la finalidad de proteger completamente el charco de soldadura para evitar cualquier tipo de contaminación existente. En cuanto a la calidad de la unión de soldadura, así como en la apariencia y penetración se verán afectadas directamente por el voltaje.

Existen diferentes tipos de zonas que se pueden presenciar en la unión de soldadura, estas zonas son: el metal base (MB) que es el material en donde se quiere llevar a cabo la unión, la zona afectada por el calor (ZAC), como su nombre lo dice es el volumen afectado por el calor de entrada de la soldadura y

la zona fundida (ZF), que es el material que experimenta la fusión del metal base y la solidificación y está relacionada con la velocidad de la soldadura.

Los autores de la bibliografía consultada, coinciden ya que trabajaron con aleaciones tanto de la serie 6XXX y 7XXX y realizaron pruebas con los procesos de soldadura GMAW y GTAW en ambas aleaciones, así como también evaluaron su comportamiento en propiedades mecánicas y metalúrgicas, manejan un rango similar en cuanto a parámetros, utilización de material de aporte y tuvieron problemáticas similares a las que se presentaron en el caso de estudio.

Entre ellos manejan similitud en cuanto a resultados y conclusiones, tuvieron la misma problemática en cuanto a porosidad con su material y formación de compuestos intermetálicos que hacían que hubiera disminución de dureza en la ZAC. Los investigadores M. Temmar y colaboradores y también Balasubramanian y compañía eliminaron esa problemática realizando pruebas post soldadura a las probetas, eliminando la porosidad en el cordón de soldadura y mejorando de un 15 a 20% las propiedades de dureza.

Esta información consultada ayudó en el caso de estudio a comprender el comportamiento en las aleaciones ya que se emplearon materiales similares que ayudaron a conocer mejor el comportamiento y rendimiento del material así como para lograr un mejor rendimiento y optimización del proceso de unión.

## **CAPÍTULO IV**

### **CASO DE ESTUDIO**

En este capítulo se presenta el análisis y resultados de las uniones de aluminio A6061-T6 y A7075-T6 mediante el proceso GTAW en placa de 6mm de espesor, las uniones de las probetas se llevaron a cabo a tope.

El metal de aporte y el metal base utilizado en las uniones fue ER-4043 para la aleación A6061-T6 y ER-5356 para la aleación A7075-T6. El procedimiento para llevar a cabo la soldadura fue de tipo manual.

Los análisis por microscopía óptica fueron empleados para la identificación de las fases presentes en las uniones de las aleaciones. Éstas se llevaron a cabo con diferentes parámetros de soldadura, basados en una serie de pruebas para identificar los valores adecuados para llevar a cabo las uniones.

Las aleaciones de aluminio son conocidas por sus principales beneficios y comportamientos, su principal característica es la ligereza, ofreciendo mayores

beneficios como ahorro de material y combustible (tanto en la industria automotriz como en la aeroespacial).

Debido a estas aplicaciones, sus requerimientos son muy estrictos y la presencia de defectos e imperfecciones es inaceptable por mínimos que sean.

## **4.1 Desarrollo experimental**

### **4.1.1 Materiales y equipo**

La preparación metalográfica se llevó a cabo en el laboratorio. Primeramente se llevó a cabo el corte de la probeta con la cortadora seguido de la montada de la muestra con baquelita una vez ya cortada y montada se procedió al desbaste en donde se utilizaron lijas desde 320 hasta la lija 2400. Al pasar por esta última lija, se utiliza el paño para dejar las muestras en acabado espejo, libres de imperfecciones y rayaduras. Cuando ya se tenían las muestras en acabado espejo, el ataque de las muestras es el siguiente paso en el cual se utilizó ácido fluorhídrico para revelar su microestructura y así poder observarla en el microscopio.





Figura 4.1 Preparación de muestras de aluminio

La composición química exacta de las aleaciones de aluminio A 6061-T6 y A7075-T6 están dadas en la Tabla 4.1 y

Tabla 4.2 respectivamente, en las cuales se aprecian sus principales elementos de aleación. El equipo de soldadura empleado en el desarrollo de la experimentación es un equipo Miller multiprocesos.

La caracterización microestructural en la zona de unión de las muestras se llevó a cabo mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (MEB). Para el perfil de microdureza se empleó un peso de 0.5 kg.

Tabla 4.1 Composición química de A6061-T6

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
(% e.p)	0.8	0.7	0.35	0.15	1.2	0.3	0.20	0.15

Tabla 4.2 Composición química de A7075-T6

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros
----------	----	----	----	----	----	----	----	----	-------

(% e.p)	0.09	0.23	1.62	0.03	2.22	0.18	5.21	0.02	0.15
---------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Para establecer los parámetros de soldadura adecuada, se desarrolló una serie de muestras iniciales, las cuales constaron de 3 uniones similares de cada aleación A6061-T6 y A7075-T6 con variación en los parámetros de corriente y amperaje, tal como se muestra en las Tabla 4.3 y Tabla 4.4.

Tabla 4.3 Parámetros de muestras de aleación A6061-T6

Muestra	Amperaje	Voltaje
1	190	16
2	180	23
3	170	25

Tabla 4.4 Parámetros muestras de aleación A7075-T6

Muestra	Amperaje	Voltaje
1	120	15
2	130	16
3	140	17

La problemática con la que se encontró fue principalmente en definir los parámetros para llevar a cabo las uniones de las aleaciones. Con los primeros parámetros obtenidos, mostrados en la Tabla 4.3 y Tabla 4.4, la primera corrida de pruebas arrojan la presencia de poros en la zona de la unión, en las muestras que más predominó la presencia de poros fue en la aleación 6061-T6 en las muestras 2 y 3, así como en la muestra 1 y 2 de la aleación 7075-T6. Por tal motivo se prosiguió con la búsqueda de otros diferentes para buscar la unión libre de defectos o en menor proporción, y en conjunto con la caracterización de las uniones observar el comportamiento en la soldadura.

Tabla 4.5 Parámetros muestras de aleación A6061-T6

Muestra	Amperaje	Voltaje
1	160	16
2	180	18
3	190	20

Tabla 4.6 Parámetros muestras de aleación A7075-T6

Muestra	Amperaje	Voltaje
1	150	17
2	160	17
3	170	17

Después de que se efectuó la primera corrida de las pruebas, se llevó a cabo una segunda. En la Tabla 4.5 y Tabla 4.6 se muestran los parámetros con los que se condujo, hubo disminución de porosidad, pero aun las muestras arrojaron presencia de porosidad, esto en la zona de fusión. Las probetas con mayor presencia de porosidad fueron las muestras 3 tanto de la A6061-T6 como de la A7075-T6 Para el conteo de porosidad lamentablemente por cuestiones de tiempo no se pudo llevar a cabo el conteo en las muestras.

## 4.2 Discusión de resultados.

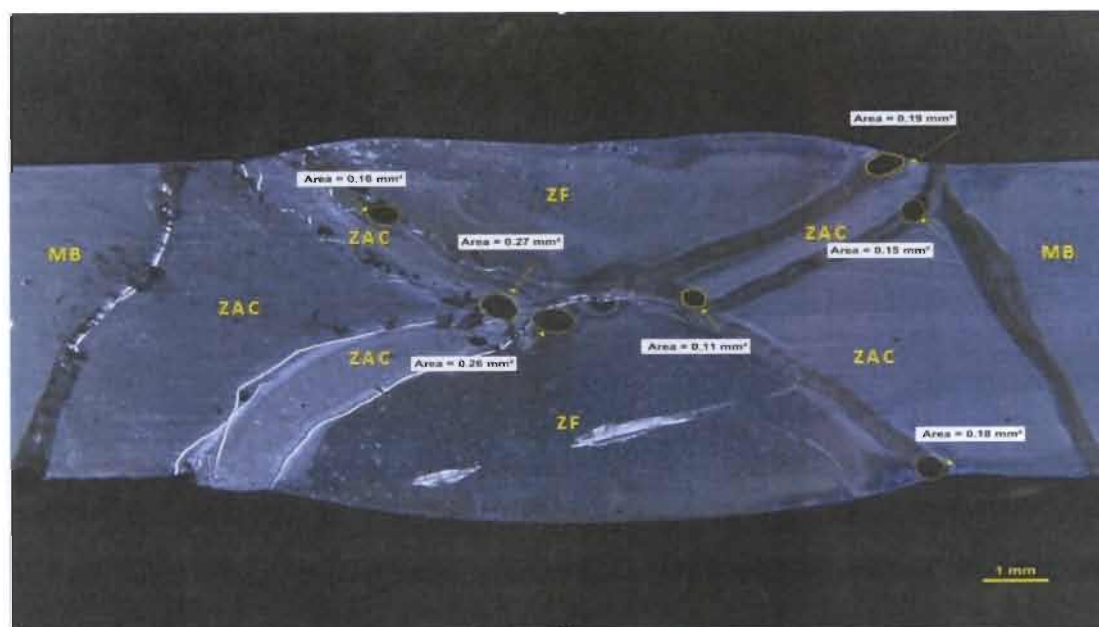


Figura 4.2 Aleación 6061 unida mediante proceso GTAW observada por estereoscopio

La imagen obtenida de la unión con la aleación A6061-T6 se presenta en la Figura 4.2 corresponde a la probeta de la muestra 1 y en esta se puede distinguir las diferentes partes que la conforman como zona de fusión, zona afectada por el calor y el metal base. Las imágenes que se presentan en la Figura 4.3 son correspondientes a las 3 muestras unidas de la aleación 6061-T6 y se muestran las micrografías en las cuales se puede apreciar la morfología granular de la aleación en el metal base (inciso a), además de poros y grietas (inciso b) y así como abundantes poros en la parte del cordón de soldadura (inciso c) y en la parte inferior de lado derecho se aprecian poros así como grietas en el límite de la zona de fusión con la zona afectada por el calor.

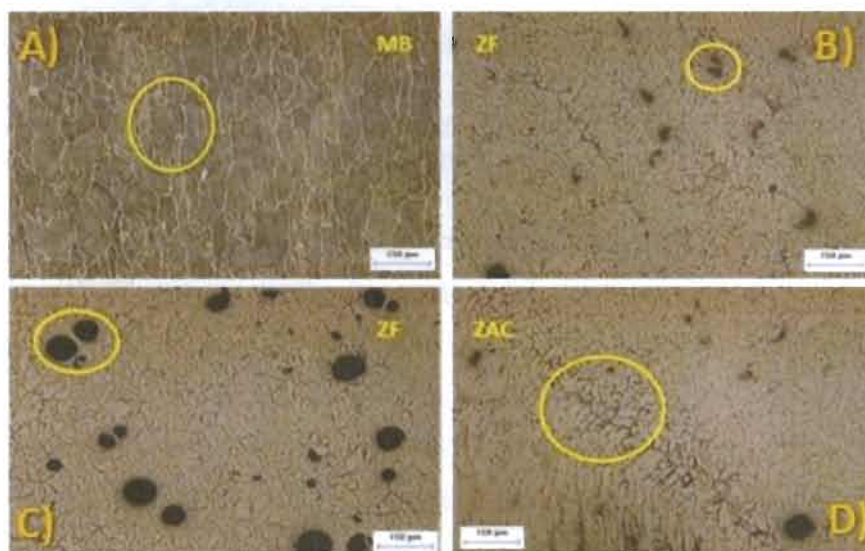


Figura 4.3 Muestras de unión de aleación A6061-T6 vista con microscopio óptico a 50X a) metal base b) zona de fusión c) zona de fusión d) zona afectada por el calor

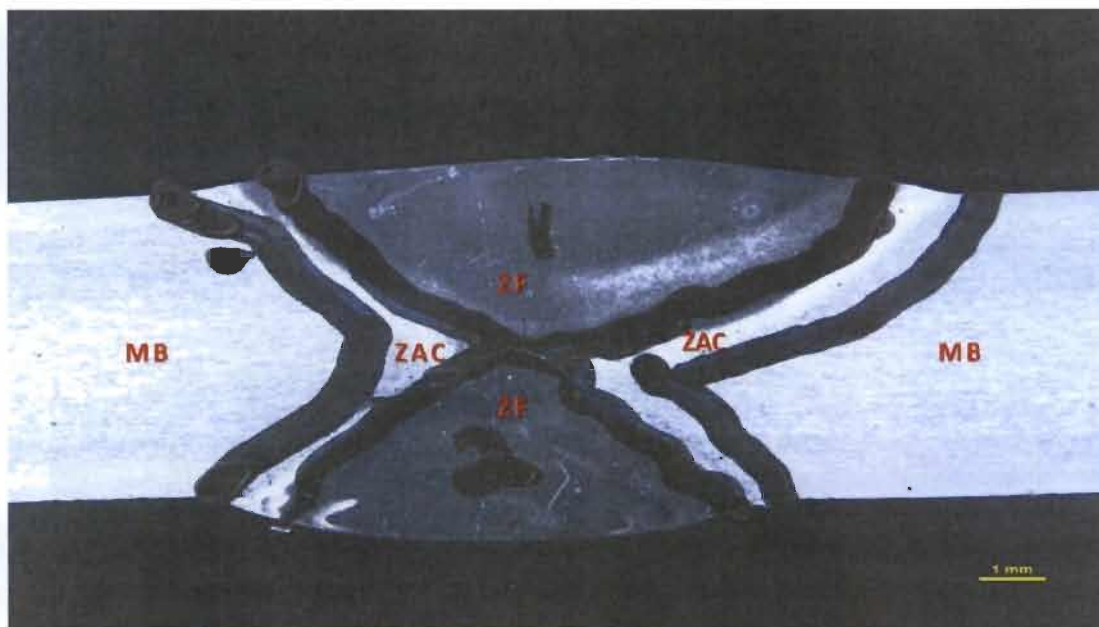


Figura 4.4 Aleación 7075-T6 unida mediante proceso GTAW observada por estereoscopio

En la Figura 4.4 se observa la unión con la aleación A7075-T6, corresponde a la muestra 1 de esta aleación y en esta se puede distinguir los principales componentes como zona de fusión, zona afectada por el calor y el metal base.

En la Figura 4.5 se observan micrografías correspondientes a las diferentes muestras de la aleación, fueron 3 muestras de esta aleación, las micrografías corresponden a estas 3 muestras tomadas en diferentes zonas del material. En las cuales se puede apreciar porosidad en la zona de fusión (inciso a), además de la estructura granular (inciso b) así como parte del material base (inciso c y d).

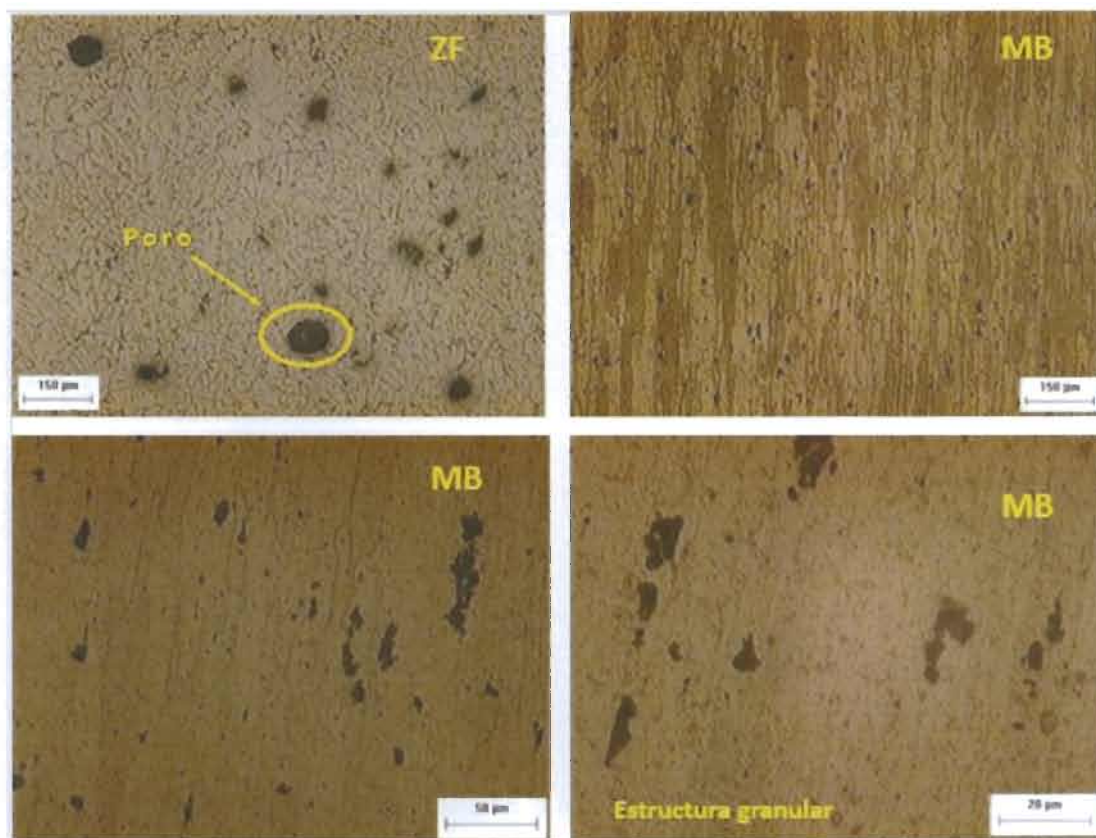


Figura 4.5 Micrografías de aleación A7075-T6 vista con microscopio óptico a diferentes aumentos.

#### 4.2.1 Microscopía electrónica de barrido

Se tuvo la oportunidad de realizar la técnica de microscopía electrónica de barrido en la Universidad Autónoma De San Luis Potosí, en donde se observa la muestra 1 tanto de de la A6061-T6 y de la A7075-T6, los resultados fueron los siguientes:

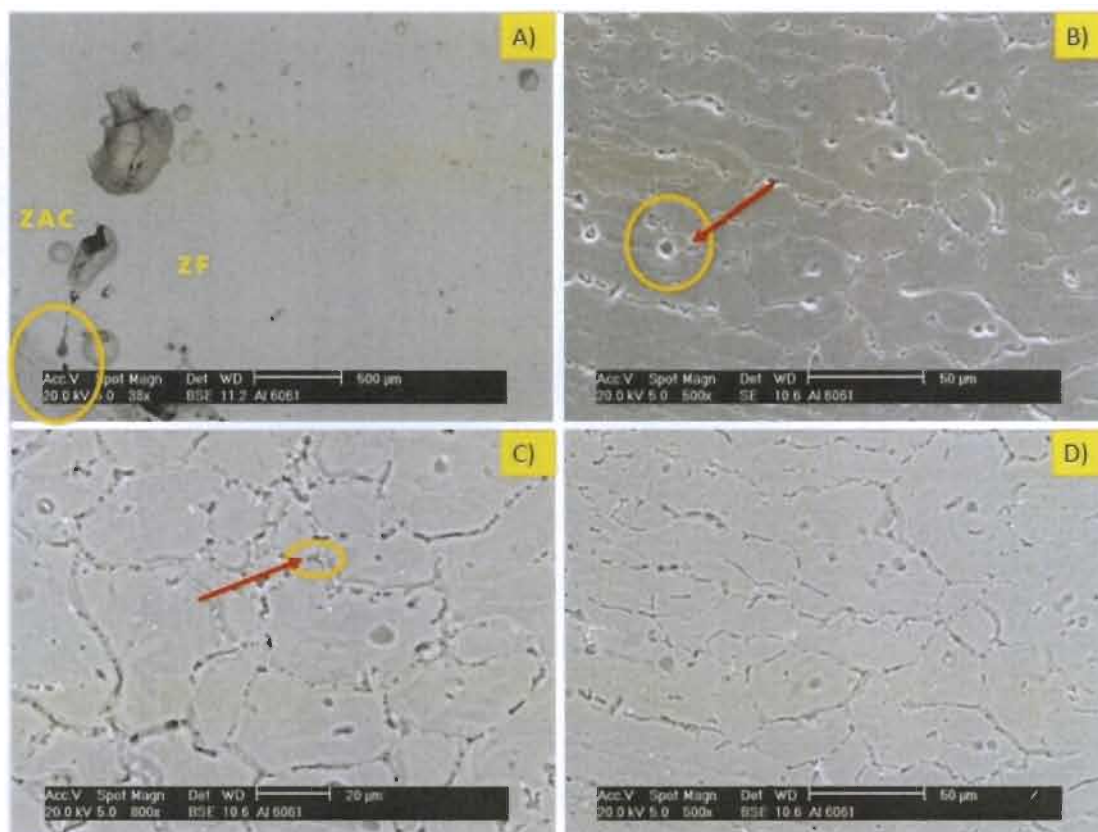


Figura 4.6 Imágenes de la aleación 6061 T6 observadas con microscopio electrónico de barrido

En la Figura 4.6 se pueden observar diversas imágenes de la aleación 6061-T6, en el inciso a) se puede observar la presencia de grietas en la frontera de la zona de fusión con la zona afectada por el calor metal base, en el inciso b) se puede apreciar la presencia de poros abundantes en la región de la zona afectada por el calor, en el inciso c) se alcanza a percatar la formación de intermetálicos en la región de la zona afectada por el calor y en el inciso d) se puede observar granos de tamaño irregular de la sección.

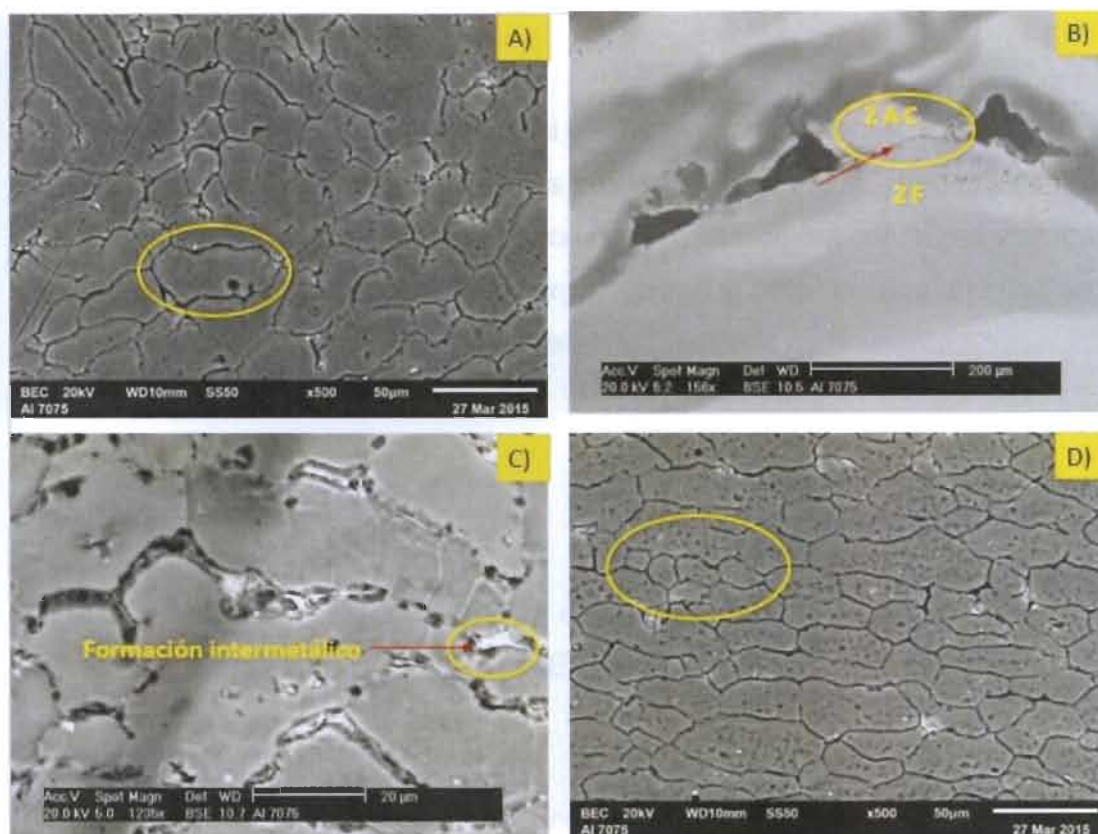


Figura 4.7 Imágenes de aleación 7075 T6 observadas con microscopio electrónico de barrido.

En la Figura 4.7 se pueden observar imágenes de la A7075-T6 en las cuales en el inciso a) se indican resaltados los límites de grano de la aleación bien definidos y alargados, en el inciso b) se observa una grieta en la frontera de la zona de fusión con la región de la zona afectada por el calor, en el inciso c) se puede observar la formación de intermetálicos de una fase en la región de la zona afectada por el calor, los cuales para saber su composición se les practicó un análisis, arrojando que eran intermetálicos del tipo AlFeCu. Finalmente en el inciso d) se observa la morfología de la aleación, se observan también unos pequeños puntos negros, estos se le atribuye a que son picaduras por el agente revelador que sobre atacó el material.



## 4.2.2 Propiedades mecánicas

La preparación de las muestras para el ensayo de tensión fue bajo la norma ASTM-E8, una vez de que se tienen las probetas son medidas al equipo para la elaboración de la prueba. El equipo hace mediciones de los esfuerzos y cargas en las probetas una vez llegado a la carga máxima la probeta llega a la fractura, se toman los datos recopilados y la prueba ha finalizado. .

### 4.2.2.1 Pruebas de tensión

Para la realización de las pruebas de tensión, se hicieron las probeta de material de acuerdo a la norma ASTM-E8, con un diámetro de 0.505 pulgadas y 2 pulgadas de longitud.

Se realizaron 2 pruebas de tensión por aleación, los resultados se muestran en las siguientes figuras (Figura 4.8 y Figura 4.9)

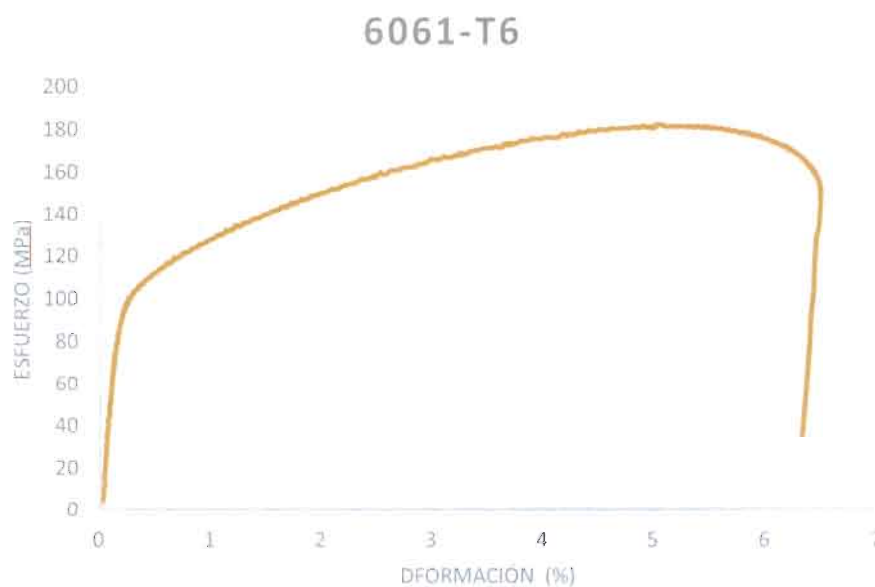


Figura 4.8 Gráfica esfuerzo - deformación A 6061-T6

La Figura 4.8 muestra la gráfica de esfuerzo contra deformación correspondiente al comportamiento de la aleación 6061-T6 en donde se muestra que el esfuerzo máximo a la tensión fue de 181MPa. La bibliografía consultada establece que el valor del esfuerzo máximo a la tensión es de 290 MPa, habiendo una gran variación en cuanto al valor obtenido en la probeta y atribuyéndole la fractura debido a la microporosidad de la muestra.

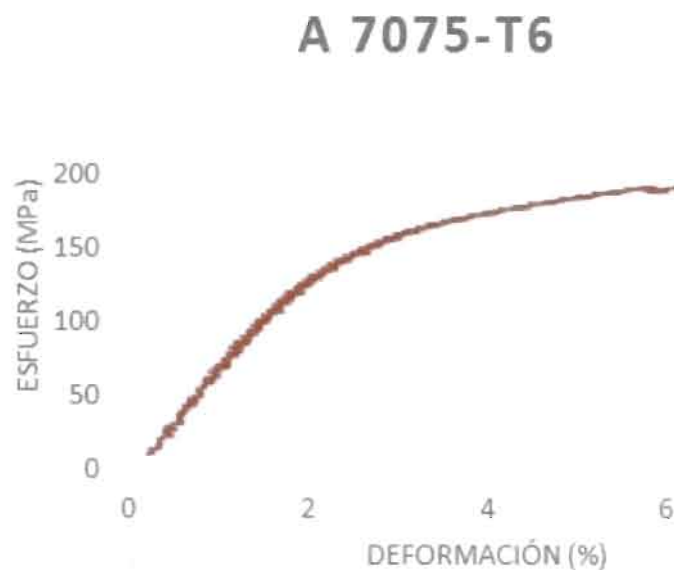


Figura 4.9 Gráfica esfuerzo – deformación A 7075-T6

La Figura 4.9 muestra la gráfica de esfuerzo - deformación correspondiente a la aleación A 7075-T6 donde la prueba arrojó datos como el máximo esfuerzo a la tensión que fue el correspondiente de 192 MPa. Al igual que en la aleación anterior, el material fracturó por microporosidad. Las pruebas tuvieron la fractura en la zona de la soldadura, la bibliografía consultada menciona que el esfuerzo máximo a la tensión para esta aleación es de 506 MPa. Por lo cual hubo una gran variación en cuanto a los valores de esfuerzo máximo a la tensión.

#### 4.2.2.2 Ensayo de dureza

Para la evaluación de las propiedades mecánicas de ambas aleaciones de aluminio se llevó a cabo un perfil de durezas empleando una carga de 0.5 kg. A continuación se muestran los resultados obtenidos durante el ensayo de durezas en la Figura 4.10



Figura 4.10 Perfil de dureza

En el caso de las durezas, para la aleación 6061-T6 Se puede apreciar que hubo pérdida de esta en la zona de unión presentando el valor más bajo en cuanto a la dureza, este valor fue de 53.5 HV, en cuanto a la zona afectada y el metal base hubo una similitud, en la zona afectada, el material presentó una dureza de 81.1 HV y el metal base 89 HV, no hubo pérdida de dureza significativa en esas zonas.

Para el caso de la aleación 7075-T6 sí hubo una pérdida significativa comparando la dureza del metal base con la dureza del cordón de soldadura. En este caso, la zona que presentó una menor dureza en comparación con todas las zonas fue la del cordón de soldadura, presentando 53.5 HV en el

cordón de soldadura y la más alta se presentó en el metal base, arrojando el valor de 91 HV.

# **CAPÍTULO V**

## **CONCLUSIONES**

Durante la realización de este trabajo se llegó a diferentes conclusiones, las cuales se describen a continuación:

En las uniones soldadas no se observaron grandes cambios en las propiedades metalúrgicas, las microestructuras no arrojaron grandes cambios solo el inicio de formación de compuestos intermetálicos en los límites de grano de la zona afectada por el calor.

En cuanto las propiedades mecánicas si hubo un cambio relevante ya que en la mayoría de las probetas se podía observar la presencia de porosidad y grietas, por lo cual se cree que sea la principal causa de deterioro en los valores de las propiedades mecánicas en ambas aleaciones hayan sido tan bajos sus valores.

En el caso de la A6061-T6 en la zona de fusión y en la zona afectada por el calor el comportamiento fue parecido mientras que en la A7075-T6 si hubo una

mayor variación, además de que las micrografías arrojaron la presencia de poros en el cordón de soldadura lo cual se le atribuye la baja dureza que presentó el cordón de soldadura.

En cuanto a durezas, el mayor valor que se observó en ambas aleaciones, A6061-T6 y A7075-T6, fue en la ZAC, obteniendo valores de 72.7 y 74.3 HV respectivamente, esto se le atribuye a la entrada de calor que presentó a la hora de hacer la unión mediante el proceso de soldadura. Los menores valores de durezas se presentaron en el cordón de soldadura, con valores promedio de 70.8 HV para la aleación A6061-T6 y 55.7 HV para la aleación A7075-T6.

En los ensayos de tensión, hubo cambios relevantes, el promedio de resistencia última a la tensión es de 190 MPa en la aleación A6061-T6 y un valor de 192 MPa para el caso de la aleación A7075-T6, como se puede notar hubo una disminución en los valores consultados en la bibliografía, en la bibliografía los valores de la resistencia última a la tensión son de 290 MPa para la aleación 6061-T6 y para el caso de la aleación 7075-T6 el valor que maneja la bibliografía es de 503 MPa. Los ensayos mostraron que el material fracturó por microporosidad, la principal causa a la que se atribuye la notable disminución de resistencia última a la tensión. Las Tablas 4.5 para el caso de la A6061-T6 y Tabla 4.6 para el caso de la A7075-T6 contienen los parámetros con los cuales se obtuvo un mejor resultado en cuanto a disminución de porosidad y agrietamiento que corresponden a la segunda experimentación ya que los primeros parámetros que se eligieron arrojaron un alto contenido de porosidad en la zona de fusión y zona afectada por el calor de los materiales, dichos parámetros se pueden observar en las Tablas 4.3 y Tabla 4.4 para la A6061-T6 y A7075-T6 respectivamente.

## RECOMENDACIONES

Dado que se trató de un caso de estudio en el cual no se contó con suficiente material para ampliarlo a un diseño de experimentos, se recomienda reproducirlo nuevamente con la finalidad de obtener evidencia más contundente sobre los parámetros identificados.

# ÍNDICE DE FIGURAS

<i>FIGURA 2.1 ESQUEMA DE TRATAMIENTO TÉRMICO T6 (11)</i> .....	27
<i>FIGURA 2.2 TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO ARTIFICIAL T6 (11)</i> .....	30
<i>FIGURA 2.3 GRANOS LIGERAMENTE ALARGADOS Y POROSIDAD EN LA ZONA SOLDADA MEDIANTE PROCESO GTAW (14)</i> .....	32
<i>FIGURA 2.4 MICROESTRUCTURA DEL METAL SOLDADO MEDIANTE EL PROCESO GTAW QUE REVELA LA PRESENCIA DE PARTÍCULAS ESFEROIDALES DE MgZn (NEGRO) Y PEQUEÑAS FORMACIONES DE PARTÍCULAS DE FeAl<sub>3</sub> (14)</i> .....	32
<i>FIGURA 2.5 MICROGRAFÍAS A7075-T6 A) ZONA DE FUSIÓN B) ZONA AFECTADA POR EL CALOR (15)</i> ....	33
<i>FIGURA 2.6 PERFIL DE MICRODUREZAS (HV) (15)</i> .....	34
<i>FIGURA 2.7 MICROGRAFÍAS METAL BASE A) SIN TRATAMIENTO Y B) CON TRATAMIENTO POST SOLDADURA (15)</i> .....	34
<i>FIGURA 2.8 PROCESO DE SOLDADURA GTAW (15)</i> .....	35
<i>FIGURA 2.9 EQUIPO PROCESO DE SOLDADURA GTAW (15)</i> .....	36
<i>FIGURA 2.10 CARACTERÍSTICAS DE TIPOS DE CORRIENTE PARA SOLDADURA GTAW (15)</i> .....	40
<i>FIGURA 2.11 PREPARACIÓN DE PROBETAS DE SOLDADURA</i> .....	46
<i>FIGURA 2.12 PROBETAS PARA PRUEBA DE TENSIÓN</i> .....	47



	81
<i>FIGURA 2.13 DIAGRAMA TERNARIO AL-MG-SI (18)</i> .....	48
<i>FIGURA 2.14 DIAGRAMA BINARIO AL-ZN (18)</i> .....	49
<i>FIGURA 2.15 PELÍCULA DE ÓXIDO EN ALEACIÓN DE AL (17)</i> .....	50
<i>FIGURA 2.16 POROSIDAD EN LAS ALEACIONES DE FUNDICIÓN DE AL-SI (17)</i> .....	51
<i>FIGURA 2.17 A) FASES INTERDENDRÍTICAS EN AA6061 EN ZONA DE FUSIÓN. B) EUTÉCTICOS TERNARIOS EN ZAC DE AA6061 (16)</i> .....	54
<i>FIGURA 2.18 PERFILES DE DUREZA DE ALEACIONES A6061 Y A7020 PROCESO GTAW (16)</i> .....	55
<i>FIGURA 2.19 PROBETA DE TENSIÓN AL INICIO, CARGA MÁXIMA Y RUPTURA</i> .....	58
<i>FIGURA 2.20 HUELLA DE INDENTACIÓN PRUEBA DE MICRODUREZA</i> .....	59
<i>FIGURA 4.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE ALUMINIO</i> .....	65
<i>FIGURA 4.2 ALEACIÓN 6061 UNIDA MEDIANTE PROCESO GTAW OBSERVADA POR ESTEREOSCOPIO...</i>	67
<i>FIGURA 4.3 MUESTRAS DE UNIÓN DE ALEACIÓN A6061-T6 VISTA CON MICROSCOPIO ÓPTICO A 50X A) METAL BASE B) ZONA DE FUSIÓN C) ZONA DE FUSIÓN D)ZONA AFECTADA POR EL CALOR</i> .....	68
<i>FIGURA 4.4 ALEACIÓN 7075-T6 UNIDA MEDIANTE PROCESO GTAW OBSERVADA POR ESTEREOSCOPIO</i> .....	69
<i>FIGURA 4.5 MICROGRAFÍAS DE ALEACIÓN A7075-T6 VISTA CON MICROSCOPIO ÓPTICO A DIFERENTES AUMENTOS.</i> .....	70

<i>FIGURA 4.6 IMÁGENES DE LA ALEACIÓN 6061 T6 OBSERVADAS CON MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO .....</i>	<i>71</i>
<i>FIGURA 4.7 IMÁGENES DE ALEACIÓN 7075 T6 OBSERVADAS CON MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO. ....</i>	<i>72</i>
<i>FIGURA 4.8 GRÁFICA ESFUERZO - DEFORMACIÓN A 6061-T6 .....</i>	<i>73</i>
<i>FIGURA 4.9 GRÁFICA ESFUERZO – DEFORMACIÓN A 7075-T6 .....</i>	<i>74</i>
<i>FIGURA 4.10 PERFIL DE DUREZA .....</i>	<i>75</i>

# ÍNDICE DE TABLAS

<i>TABLA 2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO SEGÚN SUS ELEMENTOS DE ALEACIÓN (3).</i>	
.....	17
<i>TABLA 2.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA A6061 T6 (5)</i> .....	25
<i>TABLA 2.3 PROPIEDADES FÍSICAS A6061-T6 (10)</i> .....	25
<i>TABLA 2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS A6061-T6 (10)</i> .....	25
<i>TABLA 2.5 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE A7075-T6 (10)</i> .....	28
<i>TABLA 2.6 PROPIEDADES FÍSICAS A7075-T6 (10)</i> .....	28
<i>TABLA 2.7 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN A7075-T6 (10)</i> .....	28
<i>TABLA 2.8 CLASIFICACIÓN DE ELECTRODOS DE TUNGSTENO (15)</i> .....	39
<i>TABLA 2.9 PARÁMETROS UTILIZADOS</i> .....	45
<i>TABLA 2.10 PARÁMETROS DE SOLDADURA PROCESOS TIG Y MIG (16)</i> .....	54
<i>TABLA 4.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE A6061-T6</i> .....	65
<i>TABLA 4.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE A7075-T6</i> .....	65
<i>TABLA 4.3 PARÁMETROS DE MUESTRAS DE ALEACIÓN A6061-T6</i> .....	66
<i>TABLA 4.4 PARÁMETROS MUESTRAS DE ALEACIÓN A7075-T6</i> .....	66

*TABLA 4.5 PARÁMETROS MUESTRAS DE ALEACIÓN A6061-T6 ..... 66*

*TABLA 4.6 PARÁMETROS MUESTRAS DE ALEACIÓN A7075-T6 ..... 67*

## BIBLIOGRAFÍA

1. *Aleaciones de Aluminio y su Importancia en la Industria Aeroespacial*. **Patiño, Luisa Fernanda Castro**. 2013, Metal-actual, págs. 12-16.
2. **Joseph R. Davis, Penelope Allen, Steven R. Lampman, Theodore B. Zorc, Scott D. Henry, Janice L. Daquila, Alice W. Ronke, Janet Jankel, Karen Lynn O'keefe, Robert L. Stedfeld**. *ASM Handbook volume 2 Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. decima edición. United States of America : ASM international, 1990. Vol. 2.
3. *Aluminium Physical Properties, Characteristics and alloys*. **Colden, Ron, Banbury y Alcan**. TALAT, págs. 20-28.
4. *Tratamientos térmicos para aluminio*. **Revista Metal-actual**. no especifica, metal-actual, págs. 29-36.
5. **Aluminios y metales unicornio**. metales y aluminios unicornio. *metales y aluminios unicornio*. [En línea] 24 de Septiembre de 2014. [www.metalesyaluminiosunicornio.com](http://www.metalesyaluminiosunicornio.com).
6. *Manual de diseño de estructuras de Aluminio* . **Castro, Carlos Amador Marmolejo**. Mayo de 2014, Tesis Universidad Nacional Autónoma de México, págs. 6-13, 92-99.
7. **Aluminios y metales unicornio S.A de C.V.** aluminio 6061. *aluminios y metales unicornio web site*. [En línea] 24 de Julio de 2013. [www.aluminiosymetalesunicornio.com.mx](http://www.aluminiosymetalesunicornio.com.mx).

8. **Aircraft Spruce Co** . nformación general del Aluminio. *Air craft spruce web site*. [En línea] 24 de julio de 2014. [www.aircraftspruce.com](http://www.aircraftspruce.com).
  9. **Pagani Evolución permanente**. Aluminio 6061. *Pagani web site*. [En línea] 24 de julio de 2014. [www.pagani-sa.com.ar](http://www.pagani-sa.com.ar).
  10. **aluminio y metales unicornio**. aluminio 7075. *aluminio y metales unicornio web site*. [En línea] 26 de julio de 2014. [www.aluminioymetalesunicornio.com](http://www.aluminioymetalesunicornio.com).
  11. *Aluminio en la Fabricación Automotriz*. **Metal actual**. 2013, Metal-actual, págs. 64-69.
  12. **Alcoa North American**. 7075 Aluminum Alloy. *Alcoa North American Rolled Products*. [En línea] 25 de julio de 2014. [www.alcoa.com/](http://www.alcoa.com/).
  13. **Japan Aluminium association**. aluminium statistics. *japan aluminum association*. [En línea] 25 de julio de 2014. <http://www.aluminum.or.jp/english/>.
  14. **ASM Handbook**. *MIG WELDING HANDBOOK*. E.U.A : ASM , n/e.
  15. *INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS DE SOLDADURA Y SU EFECTO EN LA CALIDAD DE UN RECIPIENTE A PRESION PARA UN CALENTADOR DE AGUA FABRICADO POR EL PROCESO GMAW*. Valdez, Ernesto Muñiz. 2006, MONOGRAFIA , págs. 18-26.
  16. mig welding parameters. [aut. libro] klas weman. *Welding processes handbook*. Philadelphia : Woodhead Publishing Limited , 2003, págs. 90-93.
  17. Alejandro, Echavarría V y Orrego P, Gustavo Adriano. Metalúrgia básica de algunas aleaciones de aluminio extruidas o laminadas. *Revista Colombiana de Materiales*. [En línea] 2012.  
<http://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/view/11281/1031>
- 9.

18. Obando, Johnny, Sánchez, Esteban y Castro Patiño, Luisa Fernanda. Tratamientos térmicos para aluminio. [En línea] 2014.

[http://www.metalactual.com/revista/31/tratamientos\\_termicos.pdf](http://www.metalactual.com/revista/31/tratamientos_termicos.pdf).

19. Ambriz, R.R., y otros. The microstructure and mechanical strength of Al-6061-T6 GMA welds obtained with the modified indirect electric arc joint. *Elsevier*. [En línea] diciembre de 2009. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909007079>.

20. Ambriz Villagomez, Roberto. Efecto de tratamientos térmicos en soldabilidad de la aleación de aluminio 7075. [En línea] 2010.

21. Torres Salcedo, Eduardo. Evolución microestructural de la aleación de aluminio 6061 durante el proceso de soldadura MIG. [En línea] Febrero de 2002.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85201205>.

22. Woodhead Publishing limited. *Fundamentals of aluminium metallurgy*. USA : WOODHEAD PUBLISHING, 2011.

# Resumen autobiográfico

<b>Nombre</b>	<b>Antonio De La Cruz Cardona</b>
<b>Grado a obtener</b>	Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial
<b>Título de Monografía</b>	<b>Análisis del comportamiento metalúrgico y propiedades mecánicas en uniones de aleaciones de aluminio 6061-t6 y 7075-t6 para aplicaciones en industria de transporte unidas mediante el proceso de soldadura GTAW</b>
<b>Títulos obtenidos</b>	Ingeniero Mecánico Agrícola
<b>Universidad</b>	Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro
<b>Lugar y fecha de nacimiento</b>	Saltillo, Coahuila 01 de abril de 1992
<b>Nombre de padres</b>	Antonio De La Cruz Díaz Patricia Cardona Valdés