CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

# ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL Y DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNIONES DISÍMILES DE ALEACIONES DE ALUMINIO 6061 Y 7075 MEDIANTE SOLDADURA FUERTE.

POR

LUIS ÁNGEL AGUIRRE HERNÁNDEZ

MONOGRAFÍA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO, COAHUILA 03 MAYO DE 2016

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

# ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL Y DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNIONES DISÍMILES DE ALEACIONES DE ALUMINIO 6061 Y 7075 MEDIANTE SOLDADURA FUERTE.

**POR**

**LUIS ÁNGEL AGUIRRE HERNÁNDEZ**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO, COAHUILA** **03 MAYO DE 2016**

**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 MICROESTRUCTURAL Y DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNIONES DISÍMILES DE ALEACIONES DE ALUMINIO 6061 Y 7075 MEDIANTE SOLDADURA FUERTE."** realizada por el alumno **LUIS ÁNGEL AGUIRRE HERNÁNDEZ** con número de matrícula **15ES-191** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

_____

**Dra. Rocío 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 **LUIS ÁNGEL AGUIRRE HERNÁNDEZ** una vez leída y revisada la Monografía titulada "**ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL Y DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNIONES DISÍMILES DE ALEACIONES DE ALUMINIO 6061 Y 7075 MEDIANTE SOLDADURA FUERTE.",** 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 15 días del mes de abril del año 2016.

**Dr. Juan Carlos Ortiz Cuellar**
Presidente

**Dra. Rita Muñoz Arroyo**
Secretario

**Dra. Rocío Saldaña Garcés**
Vocal

# AGRADECIMIENTOS

Al Corporación Mexicana de Investigación en Materiales y su Director General: MCE A. Samuel Colunga Urbina y al Coordinador general de posgrado Dr. Arturo Reyes Valdés por permitirme realizar este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo otorgado a través de la beca de posgrado.

A mi asesora la Dra. Rocio Saldaña Garcés por todo su tiempo y apoyo brindados a lo largo de este trabajo; por su asesoría, por compartir su conocimiento, por sus consejos y paciencia con mi persona, y por sus atenciones generosamente brindadas durante este trabajo.

A María Eugenia Herrera López, por los consejos y revisión de mi monografía en cada seminario. A los doctores de posgrado por los conocimientos compartidos a lo largo de la especialidad.

A mis sinodales por su tiempo y atención brindada a la evaluación de este trabajo. A todos familiares, mis amigos de vida, compañeros y conocidos por los momentos compartidos en esta importante etapa de mi vida, por su apoyo y por todas esas veces que han alegrado mi vida. A todo el personal de COMIMSA por el buen trato y por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo monográfico.

# DEDICATORIA

***A Dios…***

por darme la vida, por iluminar mi camino, darme sabiduría, porque sin ti no hubiera podido salir adelante en los momentos difíciles y de prueba, por ayudarme a terminar este proyecto, por darme la fuerza y el coraje para hacer este sueño realidad, por ponerme en este loco mundo, por estar conmigo en cada momento de mi vida. Por cada regalo de gracia que me has dado y que inmerecidamente he recibido, como la beca sin la cual no habría podido concluir mis estudios, una prueba más de tu fidelidad, gracias por llevarme a este camino en donde conocí a grandes personas y permitirme estar en lugares en los cuales amplié mis conocimientos, siempre brindándome cosas que iban más allá de mis expectativas, por lo cual me doy cuenta que no me dejas de lado, debido a eso antes que ser un profesionista quiero ser tu hijo, ya que es el mejor título que podemos tener, más valioso que todos los títulos de la tierra. No tengo palabras para agradecer lo que me has dado lo único que puedo decir es que necesitaré de tu bendición en cada proyecto que emprenda en mi vida, por lo que nunca me apartaré de ti.

***A mi Abuela Andrea***

Gracias por enseñarme a ser amoroso, honrado, cariñoso, respetuoso, por dedicarme tanto tiempo y cuidarme durante todos estos años de mi vida.

***A mis padres Sonia y José Luis***

Por todo el esfuerzo que hicieron para darme una profesión y hacer de mí una persona de bien, gracias por sus sacrificios y la paciencia que demostraron todos estos años; gracias por darme la vida.

***A mis hermanos Ronaldo y Estrella***

Quienes han sido mis amigos fieles y sinceros, en lo que he podido confiar, los cuales me dan ánimos para engrandecerme como persona.

***Al amor de mi vida***

Y por último pero no por eso menos importante, gracias a ti por llegar en el momento indicado, por darme seguridad, por hacerme el hombre más feliz del mundo, por amarme y devolverme la pasión por la vida, Te amo.

# SÍNTESIS

El desarrollo de la industria automotriz a nivel global ha innovado en una constante búsqueda de nuevos materiales más ligeros, más económicos y con buenas propiedades mecánicas con la finalidad de reducir las emisiones contaminantes a la atmósfera y a su vez representen un ahorro en combustible debido a la disminución en peso de los vehículos. Las aleaciones de aluminio ha sido una buena opción para cumplir con estas exigencias, además su uso en los últimos años se ha extendido hasta llegar a conformar en su totalidad los vehículos de diversas marcas como Audi y Chevrolet

En este documento se destaca el estudio de dos aleaciones de aluminio de la serie 6xxx y 7xxx desde sus propiedades mecánicas y metalúrgicas, así como el uso de tratamientos térmicos para la mejora de sus propiedades mecánicas.

Se investigaron principalmente las aleaciones de aluminio 6061 T6 y 7075 T6 las cuales son de uso común en las industrias antes mencionadas de manera estructural y hasta en el conformado de diversos componentes como el motor gracias a la facilidad de ser extruidas y su buena soldabilidad. De igual manera se hace referencia a otras aleaciones y el uso de diferentes materiales de aporte para mejorar las propiedades de unión en la zona de soldadura.

El proceso de soldadura fuerte, es uno de los principales procesos de unión utilizados en la industria automotriz, para este tipo de aleaciones. Se realizó un análisis del estado del arte para obtener información de los efectos que tiene sobre las uniones de aluminio tanto en sus propiedades mecánicas como metalúrgicas y observar el desempeño de la unión.

# ÍNDICE

**Tabla de contenido**

**AGRADECIMIENTOS** ..... **i**

**DEDICATORIA** ..... **ii**

**SÍNTESIS** ..... **iii**

**ÍNDICE** ..... **iv**

**CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN** ..... **2**

**1.1 Antecedentes** ..... **2**

**1.2 Objetivos** ..... **3**

1.2.1 Objetivo general ..... 3

1.2.2 Objetivos específicos ..... 3

**1.3 Justificación** ..... **4**

**1.4 Planteamiento del problema** ..... **5**

**1.5 Aportación tecnológica** ..... **5**

**1.6 Alcances** ..... **5**

**CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO** ..... **6**

**2.1 Generalidades del aluminio** ..... **6**

2.1.1 Características físicas, químicas y mecánicas del aluminio ..... 8

**2.2 Industria del aluminio** ..... **10**

**2.3 Obtención del aluminio** ..... **11**

**2.4 Clasificación de las aleaciones de aluminio ..... 12**
2.4.1 Aleaciones de aluminio para forja. ..... 14
2.4.2 Aleaciones de aluminio para fundición ..... 15
2.4.3 Tratamientos térmicos aplicados al aluminio ..... 16
**2.5 Aleaciones de aluminio serie 6000 Al-Mg-Si ..... 17**
2.5.1 Generalidades de aleaciones de aluminio 6061 T6 ..... 19
**2.6 Aleaciones de aluminio serie 7000 Al-Zn ..... 21**
2.6.1 Generalidades de aleaciones de aluminio 7075 T6 ..... 22
**2.7 Fundamentos de soldadura fuerte ..... 24**
2.7.1 Aplicaciones, ventajas y limitaciones de la soldadura fuerte .... 25
2.7.2 Principios de funcionamiento ..... 26
2.7.3 Procesos de soldadura fuerte ..... 27
2.7.4 Metales de aporte para soldadura fuerte ..... 28
2.7.5 Fundentes y atmósferas ..... 28
2.7.6 Metales base ..... 28
2.7.7 Diseño de las uniones ..... 30
2.7.8 Procedimientos de soldadura fuerte ..... 30
2.7.9 Colocación del metal de aporte ..... 31
2.7.10 Inspección ..... 32
**2.8 Metalurgia de la soldadura ..... 33**
2.8.1 Solidificación ..... 34
**2.9 Soldabilidad de aleaciones de aluminio mediante el proceso de soldadura fuerte ..... 39**
**2.10 Soldadura fuerte mediante horno de vacío en aleaciones de aluminio ..... 40**
**2.11 Componentes de aluminio en la industria automotriz ..... 67**
**CAPÍTULO 3 Análisis y discusión de la bibliografía. ..... 68**
**CAPÍTULO 4 Conclusiones ..... 71**

**Lista De Tablas ..... 73**

**Lista de Figuras ..... 75**

**CAPÍTULO 5 Referencias ..... 78**

**RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO ..... 82**

# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

El primer vehículo fabricado incorporando el uso de aluminio en el cuerpo total y en el motor, fue el Panhard Dyna en 1953, que marcó una diferencia significativa en la historia de la industria automotriz. Fue a partir de este momento que empresas con gran renombre como Ferrari, BMW y Audi empezaron a emplear el aluminio como componente en la fabricación de sus vehículos.

El aluminio es uno de los metales más utilizados en la fabricación de automóviles después del acero, debido a que brinda características como rigidez, resistencia a la corrosión, y la más importante, la reducción de peso de sus componentes. El uso de este material en la industria automotriz va desde aplicaciones interiores como exteriores, así como piezas del motor, elementos de suspensión, chasises, puertas, rines ligeros, asientos etc. Con la finalidad de fabricar carrocerías más ligeras, resistentes y que permitan al usuario reducir los costos en consumo de combustible aumentando su eficiencia e incrementando también las capacidades de carga durante el transporte.

En las instalaciones más avanzadas de fabricación de chasises y otras autopartes en la industria automotriz, uno de los procesos de unión de componentes de aluminio es la soldadura fuerte, el cual se puede emplear en aleaciones de aluminio de la serie 6000, mediante el uso de poca cantidad de material de aporte distribuido entre las superficies de unión y por el uso de un calentamiento a temperaturas muy cercanas a 450°C se consigue la unión de piezas de manera correcta, con alta resistencia y con buenas propiedades mecánicas.

En esta monografía se muestra el empleo del proceso de soldadura fuerte como método de unión para piezas de aluminio 6061 T6 y 7075 T6 así como su efecto en las propiedades mecánicas.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Realizar un análisis del estado del arte del comportamiento a nivel microestructural y de propiedades mecánicas de las aleaciones 6061 T6 y 7075 T6 unidas mediante el proceso de soldadura fuerte aplicadas en la industria automotriz.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Recopilar información de las aleaciones de aluminio 6061 T6 y 7075 T6 así como de su unión disímil mediante el proceso de soldadura fuerte utilizada actualmente en la industria automotriz.

- Determinar la viabilidad de los procesos de la soldadura fuerte mediante horno con atmósfera controlada para unir las aleaciones antes mencionadas.
- Analizar los mecanismos de formación de fases intermetálicas y su efecto en las propiedades mecánicas de las uniones de estudio.
- Fijar de acuerdo a los reportes de la literatura, bajo qué condiciones de soldadura fuerte y diseño de unión se reducen los niveles de microfallas provocados por el tiempo de permanencia en el horno de soldadura en las aleaciones 6061 T6 y 7075 T6.

## 1.3 Justificación

Desde hace muchos años, un factor muy importante en el diseño de las carrocerías de automóviles para los fabricantes, además de la seguridad, ha sido la ligereza de la misma, ya que con ello se consigue un vehículo que requiere una menor motorización, consiguiendo con esto un ahorro en el consumo de combustible y una disminución de las emisiones de $CO_2$; además la ventaja de la reciclabilidad del aluminio el cual se puede procesar una gran cantidad de veces sin perder sus propiedades.

Otro factores a considerar en la elaboración de automóviles, es el uso de procesos de unión de materiales disímiles, ya que algunos procesos de arco afectan de manera importante las propiedades mecánicas, es por eso que es necesario utilizar métodos alternativos para disminuir en lo mayor posible dichos defectos.

Por tal motivo en este trabajo se analizará la unión disímil de aleaciones de aluminio A6061-T6 y A7075-T6 mediante el proceso de soldadura fuerte con la finalidad de estudiar su comportamiento a nivel microestructural y de propiedades mecánicas, sirviendo de referencia para su aplicación en la industria automotriz.

## 1.4 Planteamiento del problema

En la actualidad la industria automotriz con la finalidad de contribuir a la conservación del medio ambiente, busca disminuir las emisiones de gases que causan efecto invernadero y a la par aumentar el rendimiento del combustible en los vehículos mediante el uso de diversos materiales que otorguen ligereza y elevada resistencia. Una alternativa que surge para el alto rendimiento del combustible, es la reducción en peso de los automóviles por medio del uso de materiales no ferrosos de los cuales destacan las aleaciones de aluminio por su densidad tres veces menor a la del acero.

Por tal motivo, el presente trabajo tiene la función de investigar, recopilar y generar información referente a uniones disímiles en soldadura de la aleaciones aluminio 6061 T6 y 7075 T6, las cuales pueden ser unidas mediante el proceso de soldadura fuerte, usado actualmente en la industria automotriz y conocer los efectos que se ocasionan en sus propiedades mecánicas.

## 1.5 Aportación tecnológica

El presente trabajo busca generar una recopilación bibliográfica que permita comprender las características en la unión de aleaciones disímiles de aluminio aplicados a la industria automotriz, así como el comportamiento mecánico y su cambio microestructural al ser sometidas al proceso de soldadura fuerte.

## 1.6 Alcances

El alcance de este trabajo consiste en analizar el comportamiento reportado en la bibliografía a nivel microestructural y de propiedades mecánicas de uniones disímiles de aleaciones de aluminio A6061-T6 y A7075-T6 mediante el proceso de soldadura fuerte.

# CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

## 2.1 Generalidades del aluminio

El aluminio es un material metálico de considerable importancia en la actualidad debido a que ocupa el segundo lugar después del acero en ser utilizado con mayor frecuencia a nivel industrial. Su existencia fue establecida en el año 1808 por Sir Humphrey Davy quien creyendo que el mineral alúmina ($Al_2O_3$) tenía una base metálica intentó extraerlo sin tener éxito, sin embargo procedió a llamar al metal alumio, llamado posteriormente aluminio. Fue hasta 1821 que el geólogo y mineralogista francés Pierre Berthier mediante el descubrimiento de un material arcilloso, duro, de color rojizo, con un contenido en óxido de aluminio del 52%, en el sureste de Francia, que denominó bauxita y mediante experimentos, intentó aislar el metal del mineral también sin obtener éxito y fue hasta 1825 que el físico y químico Danés Hans Christian Oersted logró aislar el metal por primera vez. [1] [2]

El método de extracción y obtención de aluminio se desarrolló hasta años más tarde. En el año de 1886 fue inventado simultáneamente por dos jóvenes científicos Paul Louis Toussaint Héroult (francés) y Charles Martin Hall (Estados Unidos de América), trabajando en diferentes partes del mundo, inventan un nuevo proceso electrolítico para la eliminación del oxígeno a partir de diferentes

óxidos de aluminio o alúmina, el proceso Hall-Héroult, el cual es base de toda la producción de aluminio primario a nivel comercial de alta pureza en la actualidad. El aluminio comenzó a ser producido con fines comerciales en la segunda mitad del siglo XIX, por lo cual puede ser considerado todavía un material joven, en términos comparativos, teniendo en cuenta que la humanidad ha utilizado cobre, plomo y estaño por miles de años. No obstante, la producción de aluminio en la actualidad supera en cantidad a la suma de los restantes metales no ferrosos como cobre, plomo y estaño. [1] [2]

El aluminio, es uno de los de los elementos metálicos más abundantes, pues constituye casi el 7.3% en peso de la corteza terrestre; sin embargo en la naturaleza se encuentra en combinación con otros materiales (concretamente óxidos y silicatos) [2]**.** Las propiedades que favorecen al aluminio (Al) y sus aleaciones son su alta relación de resistencia-peso, resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y eléctrica, y maquinabilidad. Las principales aplicaciones del aluminio y sus aleaciones en orden decreciente de consumo, se dan en contenedores y empaques (latas y papel aluminio), edificios y otros tipos de construcción, transporte (aplicaciones en aviones y naves aeroespaciales, autobuses, automóviles, carros de ferrocarril y artículos marinos), aplicaciones eléctricas (como conductor eléctrico económico y no magnético), productos de consumo durables (artículos domésticos, utensilios de cocina y muebles) y herramientas portátiles. Casi todo el cableado para transmisión de alto voltaje se fabrica con aluminio. [3] [4]

Los principales elementos para la industria automotriz fabricados son: pistones para motores de combustión, culatas, bloques, elementos de carrocería como cofres, aletas, portones, el grado de aleación, piezas y usos típicos de aleaciones de aluminio se muestra en la ***Tabla 2.1***. [4] [5]

**Tabla 2.1** Aleaciones de aluminio comunes y sus aplicaciones *[5]*

| Aleación | Aplicaciones | Formas |
|---|---|---|
| **1060** | Equipos químicos, y tanques. | Lamina, placa, tubo |
| **1350** | Conductores eléctricos | Lamina, placa, tubo, varilla, barra, alambre, tubo, perfiles |
| **2014** | Estructuras de avión y armazones de vehículos | Lamina, placa, tubo, varilla, barra, alambre, tubo, piezas forjadas |
| **2024** | Estructuras de avión, ruedas y piezas de maquinas | Lamina, placa, tubo, varilla, barra, alambre, tubo, remaches |
| **2219** | Piezas sometidas a altas temperaturas | Lamina, placa, tubo, varilla, barra, perfiles, tubo |
| **3003** | Equipo químico, tanques, utensilios de cocina, piezas arquitectónicas | Lamina, placa, tubo, varilla, barra, perfiles, tubo, remaches y forjadas |
| **5052** | Tubos hidráulicos, fabricaciones con lámina, electrodomésticos. | Lamina, placa, tubo, varilla, barra, perfiles, tubo y remaches |
| **6061** | Estructuras, armazones y piezas de vehículos, aeronaves y usos marinos. | Todas las formas |
| **6063** | Muebles, herrajes arquitectónicos | Tubos, perfiles extruídos |
| **7001** | Estructuras de alta resistencia | Tubos, perfiles extruidos |
| **7075** | Estructuras de aviones y para trabajo pesado | Todas las formas, excepto tubos |

### 2.1.1 Características físicas, químicas y mecánicas del aluminio

Las propiedades físicas más importantes en el aluminio son la densidad, el coeficiente de expansión térmica, alta conductividad eléctrica-térmica y es muy resistente a la corrosión atmosférica, debido a que forma una película de óxido adherida que protege al metal del ataque, cabe resaltar que las propiedades físicas más importantes son afectadas entre más puro sea el aluminio. La densidad promedio del aluminio es de 2.7 gr/cm$^3$, que si se compara con la del acero que es de 7.80 gr/cm$^3$ resulta ser cerca de la tercera parte de éste. Al igual que con la densidad, el coeficiente de expansión térmica depende de la aleación [6].

Las propiedades mecánicas no dependen solo de la pureza sino también del tratamiento térmico aplicado, por ejemplo la resistencia a la tracción y el límite elástico varían dependiendo de la aleación de 100 a 300 MPa, la resistencia a la fatiga es aceptable (sin límite de fatiga definido) y la resiliencia es relativamente elevada excepto en los aluminios más resistentes (Al-Cu, Al-Zn). Entre 200-300°C, el mejor comportamiento mecánico corresponde a los grupos Al-Cu y Al-Mg-Si, sin embargo el comportamiento mecánico a bajas temperaturas es excelente y la resistencia aumenta, mientras la resistencia, el límite elástico y el alargamiento se mantienen hasta temperaturas operativas de -195°C. En la ***Tabla 2.2*** se hace referencia a otras propiedades mecánicas del aluminio [7]**.**

**Tabla 2.2** Propiedades del aluminio *[8]*.

| **Químicas** | |
|---|---|
| Símbolo químico | Al |
| Numero atómico | 13 |
| Peso atómico | 26.9815 uma |
| Radio atómico | 0.143 |
| Isotopos | Ninguno |
| Valencia | 3 |
| Estructura cristalina | FCC |
| Parámetro de red | 0.404 nm |
| Plano de deslizamiento | {111} |
| **Físicas** | |
| Densidad | 2.7 g/cm$^3$ |
| Punto de fusión | 660°C |
| Punto de ebullición | 2,480 °C |
| Cambio en el volumen durante la solidificación | 6.70% |
| Contracción por vaciado (lineal) | 1.7-1.8% |
| Color luz reflejada | Blanco plateado |
| **Mecánicas** | |
| Módulo de elasticidad | 72.4 GPa |
| Módulo de corte | 27.5 Gpa |
| Coeficiente de Poisson | 0.31 |
| Calor especifico promedio (0-100 %) | 917 J Kg$^{-1}$ K$^{-1}$ |
| Conductividad térmica (20-100°C) | 238 Wm$^{-1}$K$^{-1}$ |
| Coeficiente de expansión térmica (0-100°C) | 23.5 x10$^{-6}$K$^{-1}$ |

Las aleaciones de aluminio presentan una gran aptitud para el conformado debido a sus bajas temperaturas de fusión (520-650°C) facilita el moldeo de

piezas complicadas (molde de arena, coquilla, por inyección se obtienen grandes piezas con mucha precisión dimensional). Su elevada ductilidad facilita el conformado por deformación plástica, en frío y en caliente mediante laminación (chapas, barras), forja o extrusión (perfiles de formas complejas, eventualmente con cavidades, que difícilmente se obtienen con otros materiales) [9]. La gran maquinabilidad a altas velocidades proporciona una productividad elevada, un ahorro de costos y de energía [10].

## 2.2 Industria del aluminio

La demanda de automóviles más livianos, de bajo consumo de combustible y mejor desempeño, ha estimulado la investigación y desarrollo de aleaciones de aluminio de alta resistencia y deformabilidad. Aproximadamente el 25% del aluminio que se produce hoy en día se utiliza en la industria del transporte, otro 25% en la manufactura de latas para bebidas y otros porcentajes en empaques, 15% en la construcción, 15% en aplicaciones eléctricas y 20% en otras aplicaciones [11]

Las aleaciones de aluminio han dado resultados satisfactorios en particular en el mercado de los vehículos comerciales de carretera, donde se ha sustituido al acero y a la madera para la carrocería de los camiones de carga, así como también los artículos estructurales del chasís, paneles y asientos en los carros particulares y autobuses. Además, el ahorro en el peso dan por resultado una economía en el combustible y también útiles ahorros en el mantenimiento debido a que no hay corrosión ni pudrición de la madera. [11] [12]

Es común un mínimo de 10% de ahorro en el combustible; a veces es el doble para vehículos bien diseñados que empleen de manera apropiada las aleaciones de aluminio. En el caso de los motores, la alta conductividad del aluminio es muy valiosa para alcanzar una mayor eficiencia**.** [11] [12]

Por sus propiedades el aluminio ha remplazado a una gran variedad de materiales tradicionales, empleándose en la fabricación de una amplia gama de productos que se utilizan principalmente en las industrias del empaque, transporte, construcción, así como sectores eléctricos, la industria automotriz, el sector aeroespacial y de bienes de consumo durable. [4]

## 2.3 Obtención del aluminio

Actualmente la producción del aluminio envuelve el uso de dos procesos industriales independientes que usan la transición de mineral natural de óxido de aluminio para la extracción del metal puro [7]. La reducción del óxido de aluminio incluye, dos principales procesos:

- **El proceso Bayer:** El cual se basa en la producción de un óxido de aluminio (alúmina) a partir de los minerales que contienen aluminio como la bauxita. Y puede ser obtenido mediante la trituración y después por procesos químicos complementarios.

- **El proceso Hall-Héroult:** El cuál es la base de producción de aluminio primario desde el óxido de aluminio separado por electrólisis, a partir del fundido de la criolita ($Na_3AlF_6$)

La mayor parte de la producción de alúmina de manera comercial en el mundo se obtiene a partir de la bauxita, mediante el proceso Bayer, el cual fue patentado en 1888 por Karl Bayer (patente alemana 43,999), en el cual a partir del procesamiento de una sosa cáustica, y mediante la aplicación de altas temperaturas y presiones, seguido por la separación de una solución resultante de aluminato de sodio y una selectiva precipitación de alúmina, se obtiene como

resultado un óxido hidratado de aluminio ($Al_2O_3$, $3H_2O$), el cual se procesa después mediante el método electrolítico Hall—Héroult, para obtener aluminio. [2] [7]

## 2.4 Clasificación de las aleaciones de aluminio

Existen aleaciones de aluminio disponibles como productos laminados, esto es, como productos aptos para conformado a los que se dan diferentes formas mediante extrusión, laminado, embutido y forjado. Existen lingotes de aluminio para fundición, al igual que aluminio en forma de polvo para aplicaciones de metalurgia de polvos. La mayoría de las aleaciones de aluminio se pueden maquinar, formar y soldar con relativa facilidad, algunas de sus propiedades mecánicas se mencionan en la ***Tabla 2.3***. Existen *dos tipos de aleaciones* de aluminio, *forjadas* las cuales son moldeadas por medio de golpes dentro de una cavidad o extruidas a través de un molde, y las aleaciones *fundidas*, las cuales son vaciadas en moldes para obtener su forma. Las aleaciones forjadas tienen propiedades más uniformes y mejor ductilidad a diferencia de las fundidas que tienen una mayor variación en sus propiedades y son menos dúctiles [4]. La clasificación de aleaciones de aluminio se divide en dos grupos:

1. Aleaciones que se pueden endurecer mediante trabajo en frío y que no se pueden tratar térmicamente.

2. Aleaciones que se pueden endurecer mediante tratamiento térmico.

El aluminio raramente se utiliza como metal puro ya que relativamente es débil, así que por lo general se encuentra aleado con diversos elementos enlistados en la ***Tabla 2.4***

**Tabla 2.3** Propiedades de aleaciones seleccionadas de aluminio a temperatura ambiente *[4]*

| Aleación (UNS) | Temple | Resistencia Máxima a la tensión (MPa) | Resistencia a la fluencia (MPa) | Elongación en 50 mm (%) |
|---|---|---|---|---|
| 1100 (A91100) | O | 90 | 35 | 35-45 |
| 1100 | H14 | 125 | 120 | 9-20 |
| 2024 (A92024) | O | 190 | 75 | 20-22 |
| 2024 | T4 | 470 | 325 | 19-20 |
| 3003 (A93003) | O | 110 | 40 | 30-40 |
| 3003 | H14 | 150 | 145 | 8-16 |
| 5052 (A95052) | O | 190 | 90 | 25-30 |
| 0.5052 | H34 | 260 | 215 | 10-14 |
| 6061 (A96061) | O | 125 | 55 | 25-30 |
| 6061 | T6 | 310 | 275 | 12-17 |
| 7075 (A97075) | O | 230 | 105 | 16-17 |
| 7075 | T6 | 570 | 500 | 11 |

**Tabla 2.4** Aleaciones de aluminio según AWS y efecto del elemento aleante principal. *[7]*

| Clave | Propiedades de la aleación. |
|---|---|
| **1xxx—Aluminio comercialmente puro.** | Propensa a endurecimiento por deformación y a soldaduras. Excelente resistencia a la corrosión, alta conductividad eléctrica y térmica, buena capacidad de trabajo, baja resistencia, alta maleabilidad no tratable térmicamente. |
| **2xxx—Cobre.** | Alta relación resistencia-peso, baja resistencia a la corrosión, tratable térmicamente .Alta resistencia a temperatura elevada. |
| **3xxx—Manganeso.** | Buena capacidad de trabajo, resistencia moderada, por lo general no tratable térmicamente. |
| **4xxx—Silicio.** | Punto de fusión más bajo, forma una película de óxido de color gris oscuro a negro, en general no tratable térmicamente. |
| **5xxx—Magnesio.** | Buena resistencia a la corrosión y soldabilidad, resistencia de moderada a elevada, no tratable térmicamente. |
| **6xxx—Magnesio y silicio** | Resistencia media; buena formabilidad, tratable térmicamente. Maquinabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión, alta resistencia a la corrosión, excelente facilidad para extrusión, buena resistencia a la tensión y facilidad para soldarse. |
| **7xxx—Zinc.** | Resistencia de moderada a muy elevada, tratable térmicamente. |

### 2.4.1 Aleaciones de aluminio para forja.

Las aleaciones de aluminio forjado se dividen en dos grandes grupos, las que reciben tratamiento térmico y las que no reciben tratamiento térmico. Las primeras son fundamentales y sus propiedades mecánicas se pueden mejorar mediante la solubilidad de la fase sólida, endurecimiento por acritud y las que pueden endurecerse estructuralmente (por solubilidad de un componente); a continuación se identifican mediante cuatro dígitos la severidad de temple que muestra la condición de la aleación de aluminio [9]. El primer dígito identifica el principal elemento de aleación como indica la ***Tabla 2.5***.

***Tabla 2.5*** *Denominaciones de aleaciones de aluminio forjable.* [13]

| Clave | Propiedades de la aleación. |
|---|---|
| **1xxx—Aluminio comercialmente puro.** | Propensa a endurecimiento por deformación y a soldaduras. Excelente resistencia a la corrosión, alta conductividad eléctrica y térmica, buena capacidad de trabajo, baja resistencia, alta maleabilidad no tratable térmicamente. |
| **2xxx—Cobre.** | Alta relación resistencia-peso, baja resistencia a la corrosión, tratable térmicamente .Alta resistencia a temperatura elevada. |
| **3xxx—Manganeso.** | Buena capacidad de trabajo, resistencia moderada, por lo general no tratable térmicamente. |
| **4xxx—Silicio.** | Punto de fusión más bajo, forma una película de óxido de color gris oscuro a negro, en general no tratable térmicamente. |
| **5xxx—Magnesio.** | Buena resistencia a la corrosión y soldabilidad, resistencia de moderada a elevada, no tratable térmicamente. |
| **6xxx—Magnesio y silicio** | Resistencia media; buena formabilidad, tratable térmicamente. Maquinabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión, alta resistencia a la corrosión, excelente facilidad para extrusión, buena resistencia a la tensión y facilidad para soldarse. |
| **7xxx—Zinc.** | Resistencia de moderada a muy elevada, tratable térmicamente. |

El segundo dígito en estas denominaciones indica modificaciones a la aleación para la serie 1xxx, el tercero y cuarto dígitos representan la cantidad mínima de aluminio en la aleación y son significativos en la serie 1xxx, pero no en otras aleaciones. Por ejemplo, 1050 indica un mínimo de 99.50% de Al y 1090 indica un mínimo de 99.90% de Al. En series del 2xxx al 8xxx el tercero y cuarto representan el número consecutivo de la aleación en el grupo y no tienen importancia numérica, por ejemplo las aleaciones 6060 y 6061 son diferentes entre sí. Una lata de aluminio para bebidas puede tener las siguientes aleaciones de aluminio, todas en la condición H19 (que es el mayor estado de trabajo en frío): 3004 o 3104 para el cuerpo de la lata, 5182 para la tapa y 5042 para la pestaña. Estas aleaciones se seleccionan por sus características de manufactura y por su economía [14].

### 2.4.2 Aleaciones de aluminio para fundición

Las denominaciones para las aleaciones de aluminio fundido también constan de cuatro dígitos mostrados, El primer dígito indica el grupo y el elemento aleante principal como indica la ***Tabla 2.6***

**Tabla 2.6** Denominación de aleaciones de aluminio fundido. *[4]*

| Clave | Elementos Aleantes |
|---|---|
| **1xx.x** | Aluminio (99.00% mínimo) |
| **2xx.x** | Aluminio-cobre |
| **3xx.x** | Aluminio-silicio (con cobre y/o magnesio) |
| **4xx.x** | Aluminio-silicio |
| **5xx.x** | Aluminio-magnesio |
| **6xx.x** | Aluminio-silicio-magnesio |
| **7xx.x** | Aluminio-zinc |
| **8xx.x** | Aluminio-estaño |

En la serie 1xx.x, el segundo y tercer dígitos indican el contenido mínimo de aluminio, al igual que el tercero y cuarto dígitos en el aluminio forjable. Para las otras series, el segundo y tercer dígito no tienen importancia numérica. El cuarto dígito (a la derecha del punto decimal) indica la forma del producto. [4]

### 2.4.3 Tratamientos térmicos aplicados al aluminio

Las propiedades mecánicas o grado de endurecimiento de determinadas aleaciones de aluminio puede mejorarse mediante tratamientos térmicos de bonificación (o de envejecimiento) que consta de tres etapas:

a) Tratamiento de solubilización de elementos de aleación, por calentamiento del material durante cierto tiempo a temperatura adecuada (disolución de materiales solubles).

b) Temple o enfriamiento rápido para producir una solución sobresaturada a temperatura ambiente.

c) Maduración (o envejecimiento) consiste en la precipitación de fases metaestables a partir de la solución sobresaturada mediante pequeñas partículas del material de aleación, ya sea a temperatura ambiente (maduración natural) o a temperatura controlada (maduración artificial, ejemplo de un tratamiento T6). [15]

Los grupos de aleación que pueden bonificarse (además de endurecer por deformación en frío) son: Al-Cu, Al-Mg-Si y Al-Zn, así como algunas aleaciones Al-Si [16].

Las condiciones en las que se encuentra cada aleación se específica mediante la designación del estado de *tratamiento térmico*, que es un sufijo por una letra y un número que se coloca detrás de la designación de cuatro cifras anteriores. El grado de endurecimiento queda definido mediante la designación de temple T o H, dependiendo de que la aleación sea tratada térmicamente o endurecida por deformación. Otras designaciones indican si la aleación esta recocida (O), tratada por solución (W) o utilizada tal y como fue fabricada (F). Las denominaciones de temple tanto para el aluminio forjable como para el fundido se muestran en la ***Tabla 2.7*** y en la ***Tabla 2.8*** se indica los tratamientos térmicos existentes para aleaciones de aluminio.

***Tabla 2.8Tabla 2.7*** Denominaciones de Temple [17].

| Clave | Tipo de tratamiento térmico |
|---|---|
| **F** | En bruto de fabricación, como en bruto de moldeo sin tratamiento mecánico ni térmico, es decir tal y como se fabrica (mediante trabajo en frío o en caliente, o por fundición). |
| **H** | Con deformación en frío. |
| **H1** | Endurecido por deformación mediante trabajo en frío para conseguirlas dimensiones deseadas, una segunda cifra hasta el 9 indica el grado de endurecimiento, correspondiendo el 8 al duro comercial y el 9 al extra duro. |
| **H2** | Endurecido con deformación en frío seguida de un recocido parcial, consta de una segunda cifra, comprendida entre el 2 y el 8, de la escala anterior. |
| **H3** | Deformación enfrió seguido de un estabilizado. |
| **O** | Recocido (desde el estado de trabajado en frío o fundido). |
| **T** | Tratado térmicamente, para obtener estados estables distintos a los F, H u O. |
| **T1** | Enfriamiento desde la conformación en caliente y maduración. natural solamente, lo sufren piezas moldeadas o extruídas que se enfrían mediante el proceso de fabricación. |
| **T2** | Igual que el anterior, pero con trabajo en frío antes de la maduración. |
| **T3** | Temple, deformación en frio y maduración natural. |
| **T4** | Temple y maduración natural. |
| **T5** | Maduración artificial solamente. |
| **T6** | Temple y maduración artificial. |
| **W** | Sólo tratado con soluciones (temple inestable). |

**Tabla 2.8** Resumen de los tratamientos térmicos de aluminio. *[16]*

| Maduración | Acritud | Enfriamiento de conformación | Enfriamiento de solubilización en horno |
|---|---|---|---|
| **Natural** | No | T1 | T4 |
| | Si | T2 | T3 |
| **Artificial** | No | T5 | T6, T7 |
| | Antes de maduración | - | T7, T8 |
| | Después de maduración | - | T9 |

## 2.5 Aleaciones de aluminio serie 6000 Al-Mg-Si

Recientes investigaciones se han enfocado en las aleaciones de la serie 6xxx. A pesar de que las series 7xxx y 5xxx la superan en valores de resistencia

mecánica, esta aleación pertenece al grupo de aleaciones para forja tratables térmicamente. Algunas aplicaciones de esta aleación son en productos laminados o extruidos que se suministran en una gran cantidad de formas (placas, bandas, planchas, barras, tubos, alambre y una gran variedad de perfiles), que se obtienen mediante diversos tratamientos térmicos (recocido “O”, deformado en frío Hxy, o envejecimiento con tratamiento Tx). La elección debe tomarse en medida a las funciones y propiedades del material, el proceso de conformado para la pieza prevista (mecanizado, deformación en frío, forja, extrusión, soldadura) y los costos totales derivados. Las aleaciones de Al-Mg-Si son un importante grupo de aleaciones, ampliamente usadas tanto en fundición como trabajadas. Las aleaciones son envejecidas y tratadas térmicamente rutinariamente en la condición T6 (ilustrada en la ***Figura 2.1***) para obtener una resistencia adecuada. La respuesta al tratamiento de envejecido de las aleaciones es muy significativa, por lo tanto, el control de la precipitación, durante un tratamiento térmico es crítico para lograr un óptimo resultado en la aleación [14].

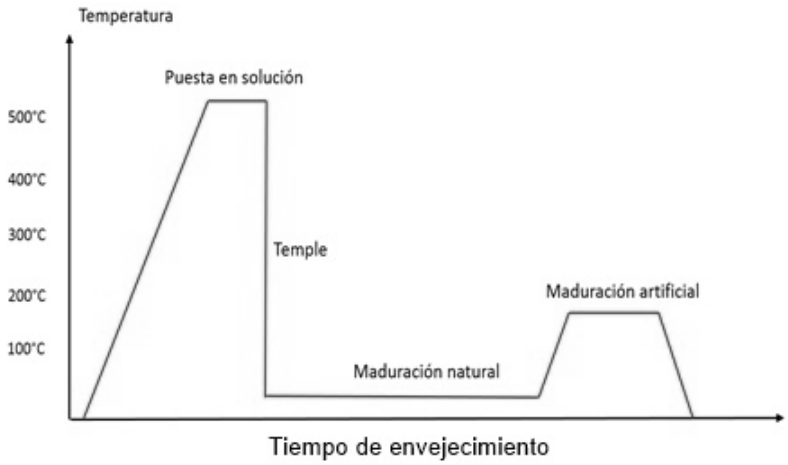


**Figura 2.1** Representación del tratamiento de envejecimiento artificial. *[18]*

Las aleaciones de aluminio con porcentajes de elementos aleantes Mg y Si inferiores en peso al 1 %, pertenecen a las aleaciones de grupo bonificables (serie 6000), con unas propiedades de conformabilidad, soldabilidad, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y aptitud al anodizado que, sin ser ninguna de ellas extraordinaria, da equilibrio a todas sus propiedades físicas y mecánicas. Las aleaciones de la serie 6000 EN AW-6060 [AlMgSi] y EN AW-6061 [AlMg,7Si] es la segunda en tener mejores propiedades mecánicas, utilizada típicamente para fabricar perfiles extruidos, especialmente para el área de la construcción y a la vez son buenos conductores eléctricos y tienen una resistencia mecánica superior a aleaciones diferentes a la serie 6000 [3].

### 2.5.1 Generalidades de aleaciones de aluminio 6061 T6

La aleación de aluminio 6061, es un producto forjado tratado térmicamente, dúctil y ligero, con gran resistencia y excelentes características de acabado. El aluminio 6061 T6 es ideal para la elaboración de piezas maquinadas con calidad de excelencia y para trabajos que requieran buen acabado superficial y alta resistencia. Esta aleación posee excelente resistencia a la corrosión atmosférica y buena resistencia en ambientes marinos y, además de facilidad de soldadura y una resistencia parecida a la del acero. La susceptibilidad a la corrosión, agrietamiento y exfoliación prácticamente no existen. Esta es una aleación de propósito general muy popular con buena facilidad de maquinado a pesar de su tratamiento de envejecimiento artificial (T6). Algunas de sus ventajas adicionales a sus características naturales son excelente conductividad, ligereza, nula toxicidad y que no produce chispa, su resistencia es superior a otras aleaciones de la serie 6xxx y son elaboradas mediante tratamiento térmicos, envejecido artificialmente, óptima conformación con el frío, excelentes características para soldadura fuerte y al arco. [19]

Las aplicaciones típicas de esta aleación incluyen construcción de cuadros y otros componentes de bicicletas, carretes para las cañas de pescar, para la construcción de aeronaves, como las alas y el fuselaje de aviones comerciales y

de uso militar ultralivianos, para la construcción de yates, incluidos pequeñas embarcaciones, en piezas de automóviles como separadores para las ruedas. [8]

En el diagrama de fases mostrado en la ***Figura 2.2*** la aleación 6061 de aluminio y el compuesto $Mg_2Si$ forman un sistema cuasi-binario que separa el diagrama ternario en dos partes.

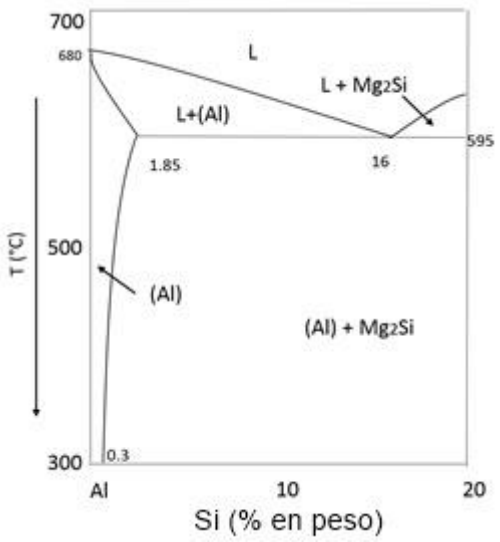


**Figura 2.2** Diagrama de fases de la aleación Al 6061. *[10]*

Dada las características propias de esta aleación, es que no existe compuesto ternario alguno, sino una mezcla de $Mg_2Si$ y $Al_3Mg_2$. El compuesto $Mg_2Si$ es considerado como un compuesto iónico, se comporta como un semiconductor. La solubilidad del compuesto $Mg_2Si$ en aleaciones de aluminio varía de una manera muy importante, en función de la temperatura por un lado y por el exceso de magnesio.

Por el contrario, el silicio no tiene efecto apreciable sobre esta solubilidad. Sin embargo, en la práctica de la fundición de estas aleaciones, se adiciona un exceso de silicio, con el objeto de evitar todo exceso de magnesio y asegurar de esta manera la solubilidad de todo el $Mg_2Si$ y garantizar las máximas propiedades

mecánicas y físicas de la aleación. Si la aleación contiene una baja concentración de aleantes de Mg y Si, entonces el compuesto puede ser disuelto durante el tratamiento térmico. Si el porcentaje está en exceso, el precipitado se distinguirá por la presencia de una estructura Widmanstätten. Por esta razón, el ajuste de la composición es vital para asegurar que no existe exceso de Mg o Si. La composición química y propiedades mecánicas de dicha aleación se muestran en la ***Tabla 2.9*** y ***Tabla 2.10*** . [20].

**Tabla 2.9** Composición química de la aleación de aluminio 6061 T6. *[8]*

| | Composición química (% e.p) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Aleación** | **Si** | **Fe** | **Cu** | **Mg** | **Cr** | **Zn** | **Ti** |
| 6061 T6 | 0.40-0.80 | 0.7 | 0.15-0.40 | 0.8-1.2 | 0.04-0.35 | 0.25 | 0.015 |

**Tabla 2.10** Propiedades Mecánicas de la aleación aluminio 6061 T6. *[8]*

| Módulo Elástico E N/mm$^2$ | Módulo Elástico Transversal G N/mm$^2$ | Intervalo de fusión °C | Conductividad térmica W/mK | Resistividad Eléctrica μΩm | Conductividad eléctrica % IACS |
|---|---|---|---|---|---|
| 70000 | 26300 | 580-650 | 155-180 | 37-43 | 40-46.5 |

Una de las principales aplicaciones de esta aleación, es gracias a su elevada resistencia a la tracción y a su excelente maquinabilidad y apariencia, se utiliza en la industria militar. [8]

## 2.6 Aleaciones de aluminio serie 7000 Al-Zn

En estas aleaciones el zinc (Zn) es añadido en proporciones que van desde el 1 al 8 %, es el elemento aleante principal en mayor proporción en estas aleaciones. A veces se añaden pequeñas cantidades de Mg para hacer la aleación tratable térmicamente. También es normal añadir otros elementos aleantes como Cu o Cr en pequeñas cantidades. Debido a que la principal propiedad de estas aleaciones es su alta dureza, se suele usar en las estructuras

de los aviones, equipos móviles y otras partes altamente forzadas. Debido a que esta serie muestra una muy baja resistencia a la corrosión bajo tensión. [21]

### 2.6.1 Generalidades de aleaciones de aluminio 7075 T6

La aleación 7075 en temple T6 es una de las aleaciones más sólidas de la ingeniería en general. En particular, cabe destacar las características metalográficas que le confieren sus excelentes propiedades mecánicas. Los elevados valores de resistencia y baja densidad son los factores claves que determinan su uso en componentes estructurales que estén sometidos a elevadas tensiones y sea necesaria una buena respuesta frente a la corrosión. Estas aleaciones son sustitutas de los aceros en estructuras que soportan sobrecarga, donde se pueden explotar las ventajas del peso menor, la rigidez específica y las correlaciones altas de la resistencia al peso. Los principales usos se encuentran en la industria aeroespacial, militar, automotriz y nuclear. [22]

La aleación de aluminio 7075 es una aleación de forja de la serie 7000. Es la más importante de este grupo y contiene entorno a un 5.1%-6.1% de Zn, entre 2.1 y 2.9% de Mg y entre 1.2 y 2% de Cu. Debido a los elementos aleantes (Cu, Mg y Zn) se trata de una aleación tratable térmicamente y susceptible de endurecerse por envejecimiento, característica que se denota por la letra T. Los números que siguen indican el tipo exacto de tratamiento térmico u otros aspectos especiales del procesado de la aleación. Este tratamiento consta de una primera etapa (solubilizado y temple) en la que se genera una solución sólida sobresaturada, y de una segunda fase denominada de envejecimiento, que puede ser natural o artificial, según se produzca a temperatura ambiente o a alta temperatura, respectivamente.

El propósito del endurecimiento por precipitación es el de crear en la aleación una microestructura formada por una dispersión densa y fina de partículas en una matriz de metal deformable. Las partículas precipitadas actúan como obstáculos que se oponen al movimiento de las dislocaciones durante la

deformación, al restringir el movimiento de las dislocaciones la aleación se fortalece, aumentando el límite elástico y la resistencia a tracción. [22]

El tratamiento térmico realizado de solubilización y temple se combina con un proceso de envejecimiento artificial en un horno a unos 120ºC aproximadamente. El precipitado básico que se forma en el tratamiento térmico es el compuesto intermetálico $MgZn_2$. La elevada solubilidad del zinc y del magnesio en el aluminio hace posible que se cree una alta densidad de precipitados y, por lo tanto, produce incrementos de dureza muy elevados, superiores a la del material de partida. Desde hace varios años el campo de estudio de estos materiales se ha enfocado en mejorar estas propiedades utilizando recursos que no sean agresivos al ser humano y al medio ambiente. [22]

La primera aleación 7075 fue desarrollada por la compañía japonesa Sumitomo Metals, en 1936. Es fuerte, con buena resistencia a la fatiga frente a otros metales y es fácil de mecanizar, pero no es soldable y tiene menos resistencia a la corrosión que muchas otras aleaciones. Debido a su costo relativamente alto, su uso es habitual en aplicaciones donde las características técnicas de aleaciones más baratas no son admisibles. Normalmente se produce para distintas categorías térmicas 7075-O, 7075-T6, 7075-T651. En la ***Tabla 2.11*** y

***Tabla 2.12*** se describe la composición nominal, y las propiedades mecánicas, respectivamente. [21]

**Tabla 2.11** Composición química de la aleación de aluminio 7075 T6. *[23]*

| | Composición química (% e.p) | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Aleación** | **Zn** | **Cu** | **Mg** | **Mn** |
| 7075 T6 | 5.1-6.1 | 1.2-2.0 | 2.1-2.9 | 0.30 |

**Tabla 2.12** Propiedades mecánicas de la aleación aluminio 7075 T6. *[23]*

| Módulo Elástico E N/mm² | Módulo Elástico Transversal G N/mm² | Intervalo de fusión °C | Conductividad térmica W/Mk | Resistividad Eléctrica μΩm | Conductividad eléctrica % IACS |
|---|---|---|---|---|---|
| 7200 | 27100 | 475-635 | 134-175 | 38-52 | 33-45.5 |

## 2.7 Fundamentos de soldadura fuerte

La soldadura fuerte une materiales calentándolos en presencia de un material de aporte que tiene un cambio a fase líquida (liquidus) por encima de 450°C, pero por debajo del cambio a fase sólida (solidus) de los metales base. El calentamiento puede proveerse de diversas maneras [24]. El metal de aporte se distribuye entre las superficies de la unión, que embonan íntimamente por acción capilar. La soldadura fuerte debe de satisfacer tres criterios:

1. Las piezas deben unirse sin fusión de los metales base.
2. El metal de aporte debe tener una temperatura de líquidus mayor que 450°C.
3. El metal de aporte debe mojar las superficies del metal base y penetrar en la unión o mantenerse en ella por acción capilar.

Para logar una buena unión usando soldadura fuerte, las piezas deben limpiarse bien y protegerse con un fundente o una atmósfera inerte durante el proceso de calentamiento para evitar la oxidación excesiva. Las piezas deben de diseñarse de modo que cuando estén correctamente alineadas provean un capilar para el metal de aporte, y se debe escoger un proceso de calentamiento

que mantenga la temperatura de la soldadura fuerte apropiada y se distribuya adecuadamente el calor.

Las uniones realizadas por brazing son dúctiles disponibles para resistir choques considerables y vibración. La técnica es ideal para unir metales diferentes. El brazing es esencialmente un proceso de un solo paso, rara vez se necesita granallar o darle un proceso de terminado a las piezas soldadas. Este proceso de unión se realiza relativamente a bajas temperaturas reduciendo la posibilidad de deformar, calentar o fundir los metales que se están uniendo.

La soldadura fuerte crea una unión metalúrgica extremadamente fuerte. El principio por el cual el metal de aporte es atraído a través de la unión para crear el enlace es la acción de capilaridad. En una operación de brazing el calor es aplicado a los metales base por completo. El metal de aporte entra en contacto con las partes calientes y se funde instantáneamente fluyendo por acción de capilaridad a través de la unión.

La soldadura fuerte en aluminio es capaz de hacer excelentes uniones en los productos de calibre fino y es especialmente útil para uniones muy complicadas, gruesas o inaccesibles que no es fácil unir por otros métodos [24].

### 2.7.1 Aplicaciones, ventajas y limitaciones de la soldadura fuerte

El proceso de soldadura fuerte se usa para unir diversos materiales con numerosos propósitos. Las aplicaciones de este proceso abarcan todas las áreas de fabricación, desde juguetes baratos hasta motores de aviones de la más alta calidad y vehículos aeroespaciales. El uso de soldadura fuerte puede producir resultados que no siempre pueden obtenerse por medio de otros procesos de unión.

Al igual que cualquier otro proceso, la soldadura fuerte tiene tanto ventajas como desventajas. Las ventajas varían con el método de calentamiento

empleado, pero en general resulta muy económica cuando se realiza en lotes grandes, algunas de las ventajas y desventajas de la soldadura fuerte se enuncian en la ***Tabla 2.13***. Un beneficio importante es la capacidad de desembalar las uniones posteriormente. También permite unir metales disímiles sin fundir los metales base. En muchos casos es posible unir varios cientos de piezas con muchos metros de uniones en una sola operación. Una desventaja de la soldadura fuerte es que requiere técnicos altamente capacitados para realizar la operación. Puesto que utiliza un metal fundido que fluye entre los materiales que se van a unir, existe la posibilidad de interacciones con el metal líquido que resultan desfavorables para la obtención de la pieza final [24].

**Tabla 2.13** Ventajas y limitaciones del proceso de soldadura fuerte. *[15]*

| **Ventajas** | |
|---|---|
| 1. | Es económica para ensambles delgados, gruesos y complejos. |
| 2. | Es una forma sencilla de unir áreas de empalme grandes. |
| 3. | La distribución de esfuerzos y térmica es excelente. |
| 4. | Conserva los recubrimientos y revestimientos. |
| 5. | Puede unir materiales disímiles. |
| 6. | Permite unir metales y no metales, sin fundir los metales base. |
| 7. | Permite desensamblar las uniones posteriormente. |
| 8. | Puede unir espesores muy diferentes. |
| 9. | Permite unir piezas de precisión. |
| 10. | Las uniones requieren poco o ningún acabado. |
| 11. | Se pueden unir muchas piezas al mismo tiempo (procesamiento por lotes). |
| **Desventajas** | |
| 1. | Existe la posibilidad de interacciones desfavorables con el metal líquido con la pieza |
| 2. | Puede haber erosión del metal base |
| 3. | Formación de fases intermetálicas quebradizas las cuales reducen la ductilidad |
| 4. | Formación de porosidad que disminuye las propiedades finales. |
| 5. | Se requieren técnicos altamente capacitados para realizar la operación. |
| 6. | Todo el conjunto se debe calentar a una temperatura aproxima el punto de fusión del metal base. |

### 2.7.2 Principios de funcionamiento

El flujo capilar es el principio básico en donde el metal de aporte fundido moja ambas superficies del ensamble. La unión deberá espaciarse de modo que permita una acción capilar eficiente y la resultante coalescencia.

La capilaridad es el resultado de la tensión superficial entre el metal base y el metal de aporte y promovido por el ángulo de contacto entre ambos. En el flujo del metal de aporte influyen consideraciones dinámicas como la viscosidad, la presión de vapor, la gravedad y las reacciones metalúrgicas entre el metal base y la soldadura.

En la aplicación de soldadura fuerte las superficies que se van a unir se limpian para eliminar contaminantes y óxidos, luego se cubren con un fundente que es capaz de disolver los óxidos metálicos sólidos y evitar una nueva oxidación.

Se calienta el área de la unión hasta que el fundente se derrite y limpia los metales base quedando protegidos contra la oxidación. El metal de aporte se funde en algún punto de la superficie de la unión, la atracción capilar del metal base y el metal de aporte es mayor que la atracción entre el metal base y el fundente por lo tanto el metal base desplaza al fundente. Al enfriarse la unión quedará llena de metal de aporte sólido y el fundente se encontrará en la periferia de la unión. En ocasiones la soldadura fuerte se realiza mediante un gas activo como el hidrógeno, un gas inerte o en vacío. [24]

### 2.7.3 Procesos de soldadura fuerte

Se designa los procesos de soldadura fuerte de acuerdo con los fundentes o los métodos de calentamiento. Los métodos de importancia industrial son los siguientes:

1.- Soldadura fuerte con soplete

2.- Soldadura fuerte en horno

3.- Soldadura fuerte por inducción

4.- Soldadura fuerte por resistencia

5.- Soldadura fuerte por inmersión

6.- Soldadura fuerte al infrarrojo

En cualquier proceso utilizado el metal de aporte tendrá un punto de fusión por encima de los 450 °C pero menor que el metal base y se extenderá dentro de la unión por acción capilar. [24]

### 2.7.4 Metales de aporte para soldadura fuerte

Para la selección de metal de aporte en el proceso de soldadura fuerte hay que considerar 4 factores en el momento de seleccionar un metal de aporte:

1.- Compatibilidad con el metal base y el diseño de la unión

2.- Requisitos de servicio del ensamble soldado

3.- Temperatura de soldadura fuerte requerida

4.- Método de calentamiento

Con el objeto de simplificar la selección del metal de aporte, la ANSI/ AWS A5.8, especificación para metales de aporte de soldadura fuerte, divide los metales de aporte en categorías y éstas a su vez en varias especificaciones. [24]

### 2.7.5 Fundentes y atmósferas

Se usan fundentes, atmósferas protectoras y vacío para evitar las reacciones indeseables durante la soldadura fuerte. Algunos fundentes y atmósferas pueden además reducir los óxidos que ya están presentes.

El empleo de fundentes o atmósferas no elimina la necesidad de limpiar las piezas antes de soldarla [24]

### 2.7.6 Metales base

Es necesario considerar el efecto de la soldadura fuerte sobre las propiedades mecánicas del metal de un ensamble soldado y la fortaleza final de la unión. [24]

Por su naturaleza, el ciclo de soldadura fuerte casi siempre recose el metal base trabajado en frío, a menos que la temperatura de soldadura sea más baja y el metal permanezca muy poco tiempo en esa temperatura. Algunos de los metales base que se pueden unir de una manera efectiva mediante el proceso de soldadura fuerte son los siguientes:

1.- Aluminio y aleaciones de aluminio

2.- Magnesio y aleaciones de magnesio

3.- Berilio

4.- Cobre y aleaciones de cobre

5.- Aceros de bajo carbono y de baja aleación

6.- Aceros herramienta de alto carbono y de alta velocidad

7.- Hierro colado

8.- Aceros inoxidables

9.- Hierro y acero al cromo

10.- Aleaciones de níquel y de alto níquel

11.- Aleaciones resistentes al calor

12.- Titanio y zirconio

13.- Carburos y cermets

14.- Cerámicas

15.- Metales preciosos

16.- Metales refractarios

• Tungsteno

• Molibdeno

17.- Metales disímiles

### 2.7.7 Diseño de las uniones

Se usan básicamente 2 tipos de uniones en soldadura fuerte: la unión de traslape y la unión a tope, tal como se muestra ***Figura 2.3*** [24] La separación de las uniones de la unión sobre el desempeño mecánico está regidos por los siguientes puntos:

1. El efecto puramente mecánico de la resistencia de la restricción de flujo plástico del metal de aporte por un metal base de mayor resistencia.
2. Posibilidad de que la escoria quede atrapada
3. Posibilidad de que haya huecos
4. La relación entre la separación de la unión y la fuerza capilar que gobierna la distribución del metal de aporte.

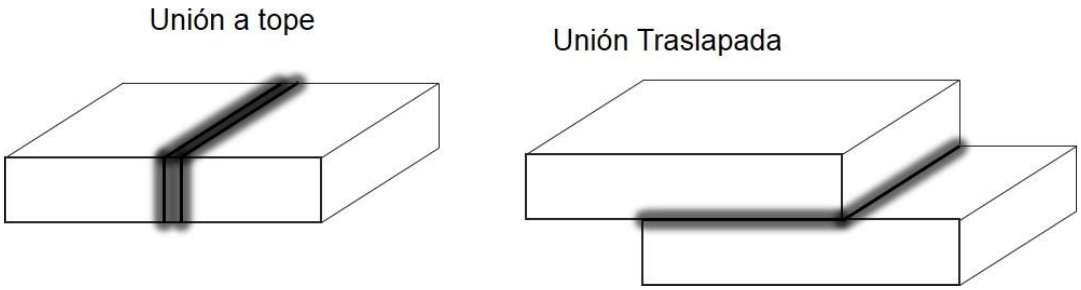


**Figura 2.3** Uniones a traslape y a tope básicas para soldadura fuerte. [25]

## 2.7.8 Procedimientos de soldadura fuerte

Es indispensable que para realizar el procedimiento de soldadura, las superficies estén limpias y libres de óxidos para asegurar uniones soldadas en fuerte íntegras y de calidad uniforme. Las grasas, los aceites, la suciedad y los óxidos evitan que el metal de aporte fluya y se adhiera de manera uniforme e interfieren con la acción del fundente con la formación de huecos e inclusiones. [25] El desengrasado generalmente se efectúa primero. Los métodos que siguen son los más comunes:

- Limpieza con disolventes.
- Desengrasado con vapor
- Limpieza alcalina
- Limpieza con emulsión
- Limpieza electrolítica

## 2.7.9 Colocación del metal de aporte

Los metales de aporte para soldadura fuerte se producen en forma de alambres, calzas polvos y pastas. Las ***Figura 2.4*** y ***Figura 2.5*** ilustran los métodos para colocar previamente el metal de aporte en forma de alambre a laminilla. [24]

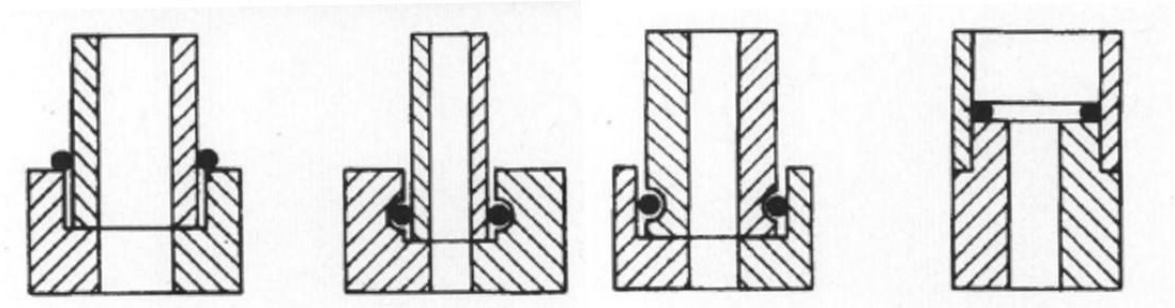

**Figura 2.4** Posiciones para pre-colocar alambre de aporte de soldadura fuerte. *[24]*

Si se hace un surco en el metal base para aceptar el metal de aporte precolocado, se deberá hacer en la sección mas gruesa. El metal de aporte se puede colocar en cualquiera de los puntos indicados en la ***Figura 2.5***. El polvo se puede aplicar seco al área de unión y luego empaparse con aglomerante, o bien puede mezclarse previamente con el aglomerante y aplicarse a la unión.

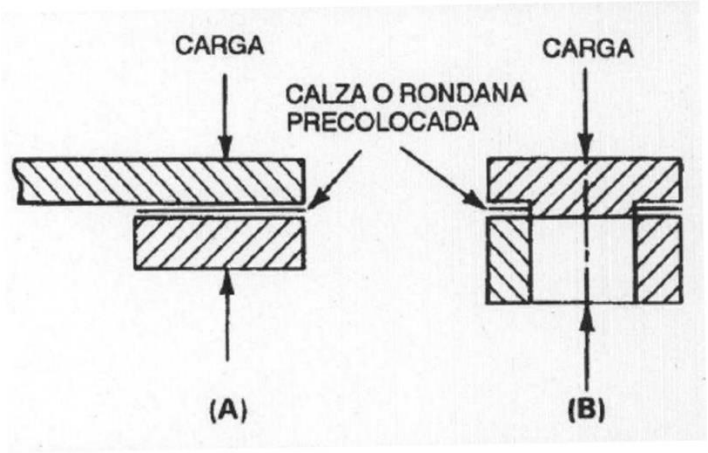


**Figura 2.5** Colocación previa de calzas de metal de aporte para soldadura fuerte. *[24]*

## 2.7.10 Inspección

La inspección puede realizarse con especímenes de prueba o probando el ensamble ya terminado. [24] Las pruebas pueden ser destructivas o no destructivas. En general las discontinuidades de soldadura fuerte pertenecen a tres clases generales:

1.- Las asociadas a requisitos dimensionales

2.- Las asociadas a discontinuidades estructurales de la unión soldada en fuerte

3.- Las asociadas al metal de soldadura fuerte o a la unión soldada.

*Métodos de Prueba No Destructivos*

Los objetivos de la inspección no destructiva de uniones soldadas en fuerte son:

1.- Detectar discontinuidades definidas en normas de calidad o códigos

2.- Obtener indicios que permitan determinar la causa de irregularidades en el proceso de fabricación.

*Los métodos de prueba no destructivos* utilizados son:

1.- Inspección visual.

2.- Prueba en servicio.

3.- Prueba de fuga.

4.-Inspección con líquidos penetrantes.

5.- Inspección radiográfica.

6.- Inspección ultrasónica.

*Los métodos de prueba destructivos utilizados son:*

1.- Inspección metalografíca.

2.- Prueba de pelado.

3.- Prueba de tensión y corte.

4.- Pruebas de torsion.

Las inspecciones destructivas y no destructivas identifican los siguientes tipos de discontinuidades de las soldadura fuerte. Las principales discontinuidades son las siguientes:

1.- Falta de llenado

2.- Fundente atrapado

3.- Filetes discontinuos

4.- Erosión del metal base

5.- Aspecto superficial insatisfactorio

6.- Grietas.

## 2.8 Metalurgia de la soldadura

Las temperaturas de soldadura fuerte están por debajo del solidus del o de los metales que se unen. Los cambios están limitados a reacciones de estado sólido en el metal base, reacciones dentro del metal de aporte sólido.

El flujo capilar del metal de soldadura fuerte depende de su tensión superficial, de sus características de mojado y de las reacciones físicas y metalúrgicas que tengan con el material base, sus óidos y el fundente o atmósfera controlada . [25]

## 2.8.1 Solidificación

Los diagramas de equilibrio de los sistemas binarios aluminio-silicio y aluminio-$Mg_2Si$ aparecen en las ***Figura 2.6*** y ***Figura 2.7*** .La fase α y el constituyente binario $Mg_2Si$ forman un eutéctico a 595 ºC que contiene 8.15% de silicio. [26]

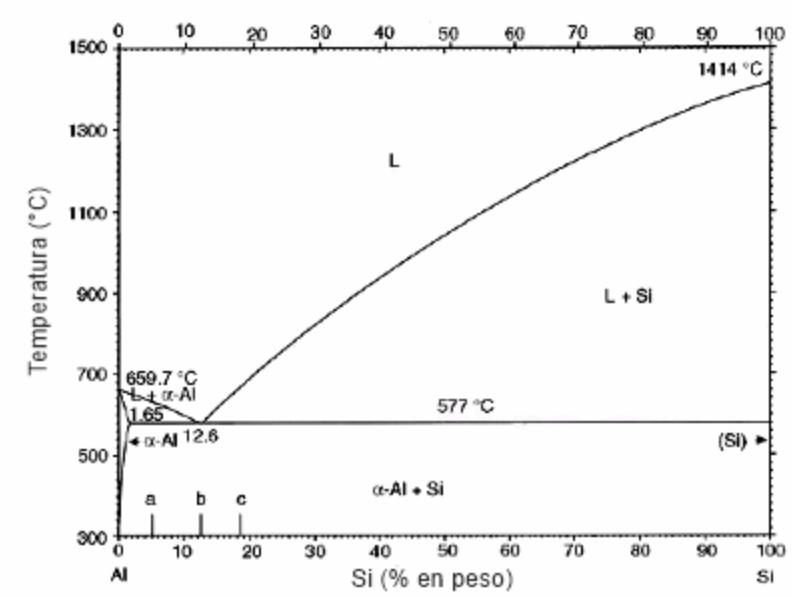


**Figura 2.6** Diagrama de equilibrio Al-Si *[26]*

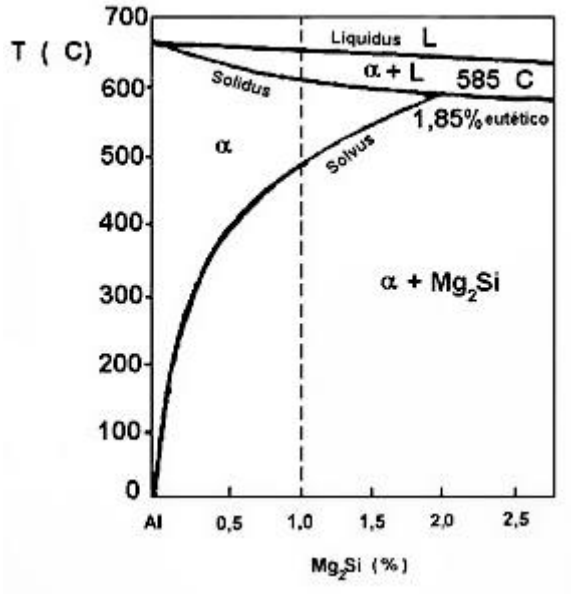


**Figura 2.7** Diagrama de equilibrio Al-$Mg_2Si$.

El conocimiento de los límites de solubilidad en este sistema aleado tiene gran importancia. El hecho de que en estado sólido se produzca una notable disminución de la solubilidad del soluto con la temperatura, permite que estas aleaciones sean susceptibles de tratamientos térmicos para mejorar las propiedades mecánicas. Mediante experimentos de solidificación interrumpida, algunos investigadores anteriormente han caracterizado la evolución de la microestructura en una aleación 6061 (Si 7.23; Mg 0.37; Fe 0.11; Mn 0.01) y han establecido la siguiente secuencia de precipitación (***Tabla 2.14***).

En la ***Tabla 2.15*** se describen las características morfológicas, cristalográficas y estructurales de las zonas GP, precipitados de transición metaestables y los precipitados de equilibrio, por orden de aparición en la solución sólida, para el sistema AlMgSi. [26]

**Tabla 2.14** Secuencia de precipitación de la aleación 601. *[26, 26]*

| | | |
|---|---|---|
| Liq → | dendritas Al | 613 ºC |
| Liq → | Al + Si | 570 ºC |
| Liq → | Al + $Al_8Mg_3FeSi$ | 570 ºC |
| Liq → | $Mg_2Si$ + Al | 570 ºC |
| Liq → | Al + $Al_5FeSi$ | 568-556 ºC |

**Tabla 2.15** Secuencia de precipitación en las aleaciones aluminio-magnesio-silicio. *[26]*

| Sistema | Precipitados | Parámetros cristalográficos de los precipitados | Epitaxia | Red cristalina |
|---|---|---|---|---|
| Al-Mg-Si | Clusters de Mg y Si, zonas GP. La línea solvus GP aparece a T más altas que la T de envejecimiento | Invisible por TEM | Zonas/ [001]Al | |
| | β'' | a=1,533nm b=0,305nm c=0,683nm β=106º | Agujas coherentes a lo largo de [001]Al | monoclínico |
| | β' $Mg_2Si$ | a=0,705nm c=0,305nm | Barras semicoherentes a lo largo de [001]Al | hexagonal |
| | B' | a=1,03nm c=0,305nm | Barras semicoherentes a lo largo de [001]Al, compuesta por β'', favorecido Si-Mg | hexagonal |
| | β $Mg_2Si$ | a=0,639nm | Plaquetas en $[001]_{Al}$, puede transformarse en β' | ccc |
| Al-Si | silicio | a=0,532nm | Plaquetas en $(001)_{Al}$, $(111)_{Al}$, $(112)_{Al}$. | Cúbica del diamante |

En la ***Figura 2.8*** se muestra una representación esquemática de la evolución de estos precipitados desde las estructuras GP hasta las condiciones de equilibrio. La composición química y la estructura cristalográfica de numerosas fases de transición están aún por conocerse en muchos sistemas. En los sistemas que nos ocupan, el mecanismo de precipitación tiene lugar.

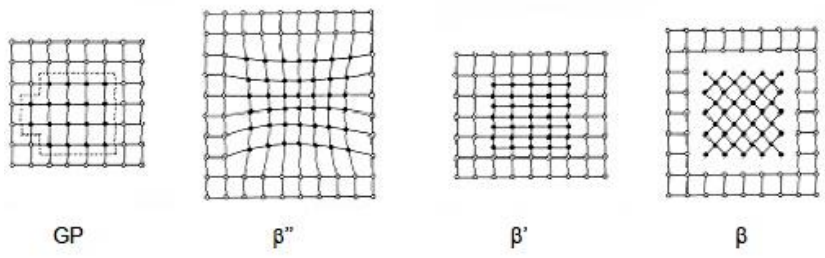


**Figura 2.8** Secuencia de precipitación en aleaciones de aluminio-magnesio-silicio. *[26]*

En el caso de las aleaciones de moldeo aluminio-silicio-magnesio, con elevada cantidad de silicio, sólo la parte de silicio libre (no precipitado como silicio eutéctico) tiene participación en el endurecimiento estructural. La descomposición de la solución sobresaturada se inicia con la formación de agrupaciones de átomos (clusters) de silicio. Estas agrupaciones conducen a la formación de zonas esféricas GP coherentes que se alargan en la dirección de la matriz cúbica que forma la aguja. Las zonas GP son relativamente estables y pueden existir hasta 260 ºC. Con el calentamiento prolongado, las zonas GP evolucionan para formar las barritas de precipitado β', semicoherentes con la matriz. La fase final de equilibrio son placas incoherentes con la matriz. Aunque esta secuencia es totalmente conocida, no hay muchos artículos que traten la relación entre la morfología y los parámetros de envejecimiento. [26]

En la etapa de puesta en solución para el tratamiento térmico T6, en las aleaciones Al-7%Si-Mg (A356 y A357) influye, no sólo en la disolución del compuesto $Mg_2Si$, sino también en la esferoidización y engrosamiento del silicio eutéctico. Estos estudios se han realizado en aleaciones modificadas con estroncio, con un contenido en hierro de 0.12% y contenidos de magnesio entre 0.3 y 0.7%.

La etapa de puesta en solución de un tratamiento T6 desempeña varias funciones importantes: disolución del $Mg_2Si$, homogeneización de la solución sólida y fragmentación, esferoidización y engrosamiento del silicio eutéctico. La fase α-Al se enriquece en silicio y magnesio. Los cambios en la morfología del

silicio eutéctico son generalmente más lentos, comenzando al cabo de varias horas, y dependen de parámetros tales como la temperatura de puesta en solución y el tamaño/forma de la partícula original que, a su vez, vienen determinados por las condiciones de solidificación, tamaño de grano y de modificación del eutéctico. [26]

La selección de las temperaturas de tratamiento es crítica ya que altas temperaturas pueden provocar la fusión parcial mientras que temperaturas bajas no ofrecen una completa homogeneización. Las propiedades mecánicas de las aleaciones Al-7%Si-Mg están gobernadas por el nivel de magnesio retenido en la matriz después del tratamiento de puesta en solución y temple, el cual está disponible para la precipitación durante el proceso de envejecimiento. El porcentaje de magnesio disuelto y los parámetros de envejecimiento controlan el límite elástico de la aleación y el grado de endurecimiento. Una matriz con elevado contenido en magnesio tiene un límite elástico y un nivel de endurecimiento mayor, mientras que baja la ductilidad y la tenacidad a fractura.

El magnesio hace disminuir la temperatura del eutéctico y provoca que la estructura del silicio sea más heterogénea, también interfiere en la modificación de la estructura del eutéctico cuando se adiciona estroncio, haciendo que la estructura del eutéctico sea más gruesa y menos uniforme. El contenido en magnesio también afecta a la forma y a la fracción de volumen de las fases que contienen hierro. Como es sabido, estas fases reducen la resistencia a esfuerzos de tracción.

La metalografía cualitativa y cuantitativa ha mostrado que, además de los cambios mencionados anteriormente, el tratamiento de puesta en solución también supone cambios en cuanto a las proporciones relativas de partículas de intermetálicos que contienen hierro, y estos cambios dependen de la composición. Los intermetálicos que contienen hierro observados en aleaciones en estado bruto de colada, son la fase β ($Al_5FeSi$) que aparece en forma de laminillas, y la fase π ($Al_8Mg_3FeSi_6$), que aparece bajo la morfología de "escritura china" o de bloque; a veces, ambas crecen directamente sobre las laminillas de

β. Estas dos fases aparecen en las regiones interdendríticas/intergranulares. En ausencia de manganeso, los intermetálicos de hierro cristalizan únicamente bajo la forma de agujas (β) para todas las velocidades de enfriamiento. Sin embargo, con la adición de manganeso, los intermetálicos de hierro cristalizan en forma de agujas (fase β-AlFeMnSi) o de escritura china (fase α- AlFeMnSi), y su fracción en volumen depende de la velocidad de enfriamiento. [26]

## 2.9 Soldabilidad de aleaciones de aluminio mediante el proceso de soldadura fuerte

Las aleaciones de aluminio  no tratables térmicamente, y muchos de las aleaciones de aluminio tratable térmicamente, se pueden soldar en fuerte. En el primer grupo se encuentras las aleaciones 1100, 3003, 3004, y 5005 son las aleaciones que mejor responden a la soldadura fuerte. En el segundo grupo se encuentran las aleaciones, 6061, 6063, y 6951 que son muy comúnmente usadas en este tipo de soldadura. Algunas aleaciones que no son adecuados para soldadura en fuerte; son sobre todo aquellas con puntos de fusión bajos, lo que exige temperaturas de soldadura fuerte por debajo de la temperatura de fusión, utilizando aleaciones de relleno existente, que incluye a las aleaciones 2011, 2014, 2017, 2024, 7075 y aleaciones. [25]

Sin embargo, el grupo quizás más importante de aleaciones está formado por aquellas que son tratables térmicamente, teniendo lugar el endurecimiento por precipitación. Tales aleaciones combinan elementos químicos como el Cu, Zn, Si y Mg formando las series 2000 de Al-Cu y Al-Cu-Mg, la 6000 de Al-Si-Mg y la 7000 de Al-Zn-Mg, todas ellas endurecibles por precipitación.

Un segundo grupo de aleaciones es difícil de unir mediante soldadura fuerte debido a los flujos existentes los cuales no son efectivos en la eliminación de sus óxidos tenaces. Estas son las aleaciones de la serie 5xxx que tienen más de 2% de magnesio.

Sin embargo, este último puede ser soldada en un horno de vacío si se tiene cuidado especial. Sin embargo, piezas con geometría compleja de aluminio son difíciles de soldar no sólo porque no se mojan fácilmente con el metal de relleno, sino también porque tienden a contener grandes cantidades de gas y los contaminantes que expanden durante la soldadura suelen causar agrietamiento. El aluminio puede ser soldado a cualquier otro metal como el acero, níquel, titanio, berilio. No se suelda a magnesio debido a que el conjunto resultante es muy frágil y no de uso práctico. También dan como resultado compuestos intermetálicos frágiles que se forman en soldaduras entre el aluminio y el cobre, y entre el aluminio y el latón, de manera que estas combinaciones tienen poca aplicación. Sin embargo, materiales de transición se pueden utilizar para unirse aluminio a cobre y latón por soldadura fuerte. [25]

## 2.10 Soldadura fuerte mediante horno de vacío en aleaciones de aluminio

Las aleaciones de aluminio son constantemente utilizadas para el manejo de fluidos dentro de la industria, mayormente en los intercambiadores de calor (evaporadores y condensadores), de aplicación factible en la industria automotriz y de refrigeración.

El proceso de soldadura brazing en hornos del tipo continuo o semi-continuo con el uso de atmósferas de vacío es esencial en la producción de estos artículos base aluminio. Actualmente, se han realizado esfuerzos por disminuir el punto de fusión de las aleaciones y metales empleados agregando microaleantes como el germanio con resultados satisfactorios, pero el costo está muy por encima de la aleación más común en el mercado (Al-12 Si).

Este tipo de aleaciones por lo general se someten a procesos de soldadura fuerte continuo para ciclos de ensamble con un morado predeterminado (rociado del fundente), un proceso de secado, un precalentamiento y un proceso de fusión

(soldadura fuerte). Posteriormente, la unión es sometida a un ciclo de enfriamiento por etapas. [25]

Durante los últimos años se han reportado diversos trabajos que tratan sobre las uniones símiles y disímiles de aluminio para mejorar las propiedades mecánicas en la unión de soldadura. Parte de este interés se debe a que se pretende optimizar las variables para contrarrestar los efectos de las discontinuidades presentes en los procesos de soldadura fuerte siendo la de mayor importancia la fusión incompleta que origina la presencia de fugas en los ensambles requeridos para el manejo en la industria automotriz. De aquí la mayor parte de estudios han estado centrados en el estudio de la fusión en las uniones de soldadura por el proceso de soldadura fuerte en materiales símiles y aunque en menor cantidad, también en materiales disímiles. [21]

En este sentido en el año 2002 Nayeb-hashemi y col., del departamento de mecánica, industria y manufactura de la universidad del noreste de Boston de Estados Unidos, reportaron un estudio acerca de los efectos de las variables de procesamiento de soldadura brazing en aleaciones de aluminio. En este estudio se observaron los efectos del periodo de soldadura sobre el espesor en la unión y sobre la microestructura, propiedades de tensión, la microdureza y micro mecanismos de falla para aleaciones de aluminio 3003 en forma de placas conectadas por una capa de material de aporte de aluminio 4047. Se concluyó que la cantidad de la microestructura del eutéctico aluminio-silicio en la zona de reacción disminuyó con el aumento en el periodo de soldadura fuerte y con la disminución de espesor de la unión. Esto se atribuyó a la difusión de silicio a partir del material de unión y la disolución de metal de base y su entrada en la unión de forma líquida. Esta disolución y el incremento en el periodo de soldadura fuerte incrementaron el porcentaje de porosidad en la zona de reacción lo cual influenció en las propiedades de resistencia en la unión. Se encontró que la cantidad de porosidad de contracción en la zona de reacción aumentó con el aumento de tiempo de soldadura debido a la solubilización en el material base como lo indica las micrografías de la ***Figura 2.9*** y ***Figura 2.10***, éstas muestran dendritas de la

solución sólida (línea gris) y la matriz eutéctica de aluminio-silicio (parte obscura) ambas visibles en la zona de reacción, en donde se muestran varios compuestos intermetálicos de aluminio con hierro, manganeso, cobre y silicio, los cuales se encontraron en el material base y en la interfaz entre el material base y el material de aporte. [27]

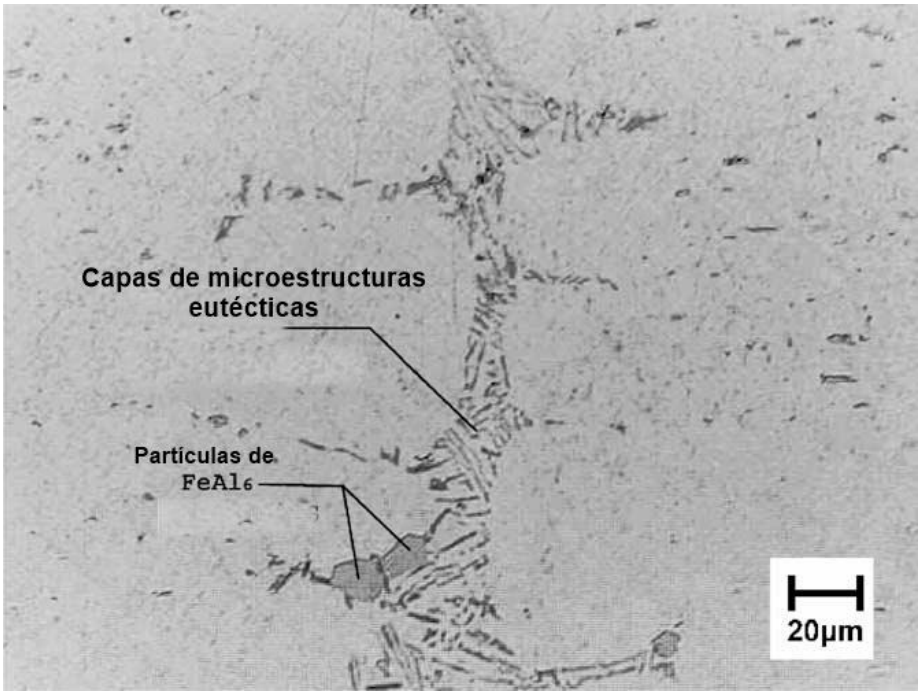


**Figura 2.9** Fotomicrografía de una unión de soldadura fuerte de las aleaciones de aluminio 3001 con un material de aporte 4347 durante un periodo de 10 min y con un espesor de 0.00 mm. *[27]*

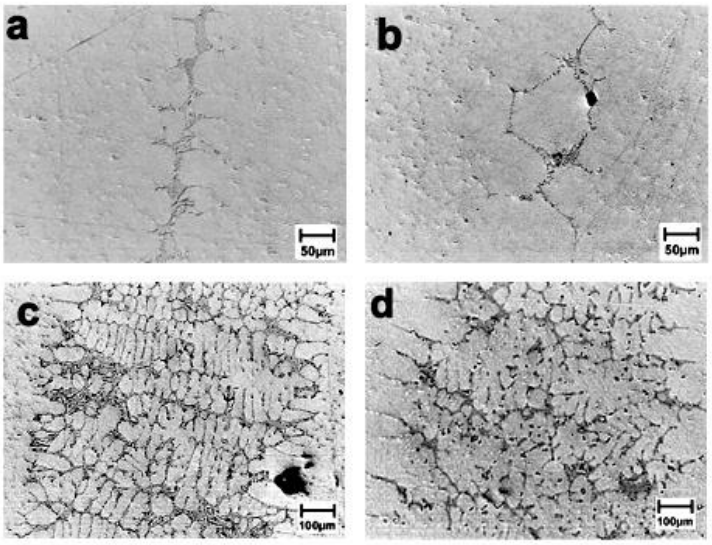


**Figura 2.10** Fotomicrografías de las uniones de soldadura fuerte, periodos de duración y espesor de la unión (a) 10 min y 0.00 mm (b) 40 min y 0.00 mm (c) 10 min y 0.254 mm (d) 40 min y 0.254 mm. *[27]*

Las probetas utilizadas para ensayos de tensión fueron sometidas a pulidos para eliminar los óxidos y cualquier material de relleno que quedan en la superficie de las muestras. Estas fueron preparadas de acuerdo a la norma ASTM E8-99 por todos los ensayos de tracción. Además de muestras soldadas, las propiedades mecánicas del material base y material de aporte fueron medidas en el estado en que se recibieron y después de exponerlos a la soldadura fuerte. [27]

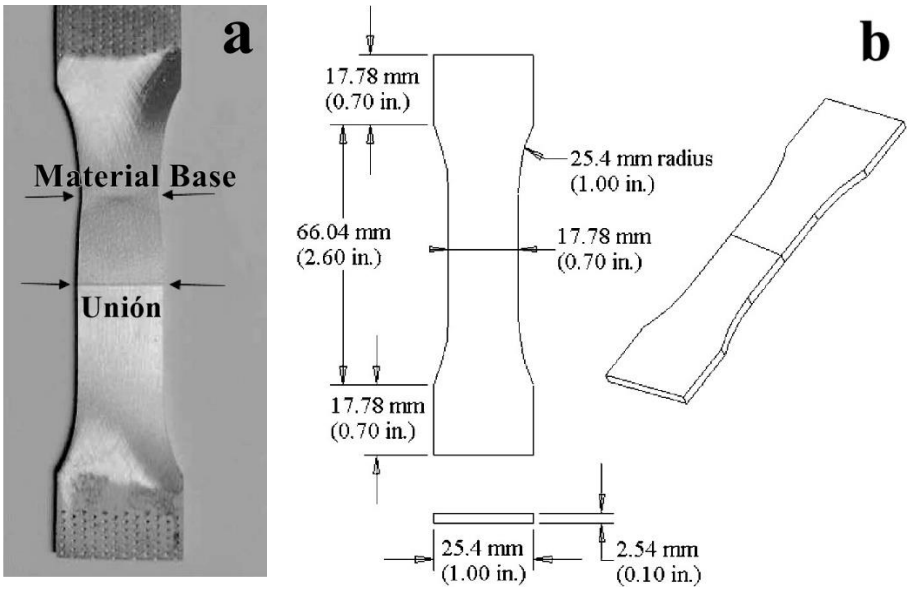


**Figura 2.11** a) Probeta de tensión indicando la unión y el material base b) dibujo esquemático de los especímenes de tensión, ambas de acuerdo a la norma ASTM E8-99. *[27]*

La resistencia a la tensión (***Figura 2.13***) de las uniones disminuyó con el aumento del periodo de soldadura fuerte al igual que el espesor en la unión ( ***Figura 2.12*** ). Esto se atribuyó a la microestructura y porosidad de contracción en la cual fue la causa principal de la disminución en la resistencia de la unión.

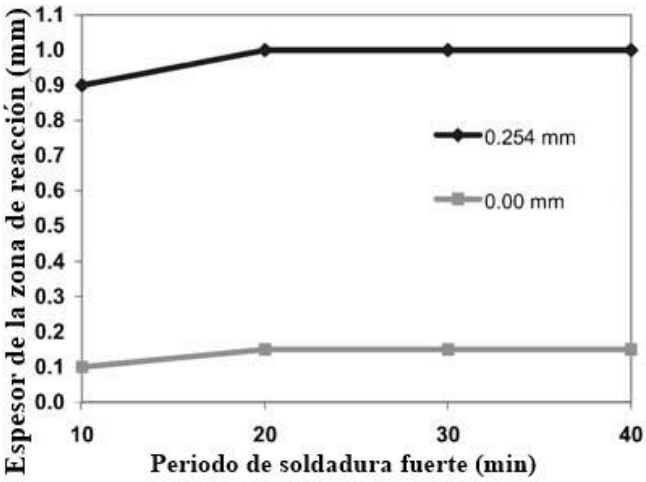


**Figura 2.12** Variación del espesor de la zona de reacción debido al periodo de soldadura fuerte. *[27]*

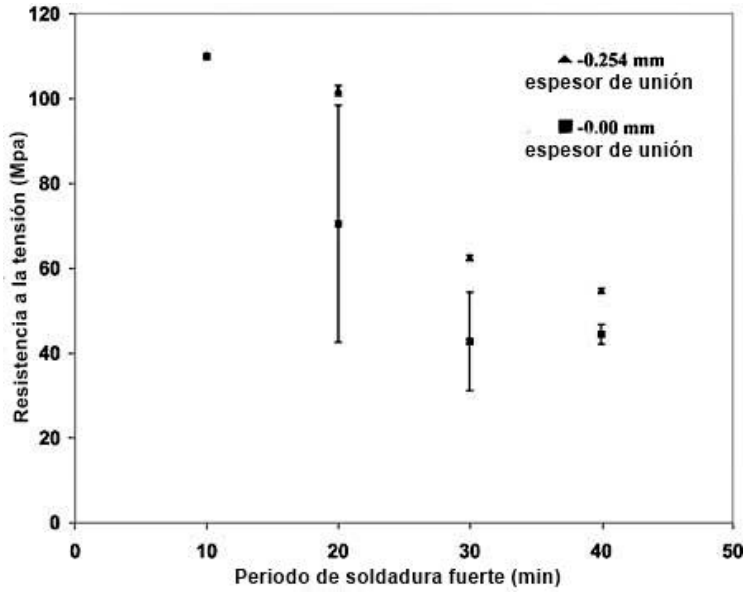


**Figura 2.13** Variación de la resistencia media a la rotura por tensión a diversos periodos de soldadura fuerte. *[27]*

Las juntas con soldadura fuerte tuvieron un período de 10 minutos las cuales fallaron dentro del material base, mientras que a períodos mayores a 10 minutos se encontró que las uniones fallaron dentro de la microestructura eutéctica aluminio-silicio de la zona de reacción. Esto indicó que la resistencia de la unión era mayor que el material base para la unión de soldadura fuerte con un período de 10 minutos, los resultados más importantes de esta investigación se visualizan en la ***Tabla 2.16*** [27]

**Tabla 2.16** Valores de microdureza del material de base y material de unión de acuerdo con el periodo de soldadura y al espesor de la unión *[27]*.

| | Promedio de números de dureza Knoop (HK) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Espesor de unión 0.00 mm | | | | Espesor de unión 0.254 mm | | | |
| **Periodo de soldadura fuerte** | 10 min | 20 min | 30 min | 40 min | 10 min | 20 min | 30 min | 40 min |
| **Zona de reacción** | 78.7 | 71.3 | 46.7 | 49.9 | 66.6 | 60 | 62.3 | 60.7 |
| **Metal base** | 43.1 | 42.6 | 39.8 | 41.3 | 40.6 | 42.8 | 42.6 | 40.7 |

En un estudio similar en 2008 Macías López y col., investigadores de la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales SA de CV (COMIMSA)

reportaron el análisis de soldaduras realizadas en un intercambiador (radiador) de calor base aluminio recubiertas con soldadura del tipo AW-4343 7.5% Si. En el estudio utilizaron un horno semi-continuo de ensamble completo, cabezal, tubo plano y aleta, seguido por los procesos de mojado (rociado del fundente), secado a 579°C, un proceso térmico de precalentamiento a 587°C y fusión (soldadura fuerte) de la pieza de trabajo alcanzando temperaturas de 592°C, posteriormente la unión fue sometida a un enfriamiento por etapas (enfriamiento lento y rápido). Las aleaciones del metal base utilizadas en el cabezal es AA3005 y para el tubo plano AA3003, así como la aleación del metal de aporte del recubrimiento tipo "Cladding" AW-4343 7.5% Si. Se muestra para las tres la composición química en la ***Tabla 2.17***. [21]

**Tabla 2.17** Composición química del cabezal, del tubo plano y del material de aporte AW-4343 7.5% Si. *[21]*

| AA designación (% e.p.) | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti | Otros | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3005 | 0.6 | 0.7 | 0.3 | 1.5 | 0.6 | 0.1 | _ | 0.25 | 0.1 | 0.15 | Bal. |
| 3003 | 0.6 | 0.7 | 0.2 | 1.5 | _ | _ | _ | 0.1 | _ | 0.15 | Bal. |
| 4343 | 8.2 | 0.8 | 0.25 | 0.1 | _ | _ | _ | 0.2 | _ | 0.15 | Bal. |

Los cupones de prueba se obtuvieron de un intercambiador de calor del tipo "Radiador", los sub-ensambles se muestran en la ***Figura 2.14***. La inspección visual de los sub-ensambles del intercambiador muestra discontinuidades relevantes en la unión del tubo plano con el cabezal en el área de soldadura ver ***Figura 2.15*** y ***Figura 2.16***. [21]

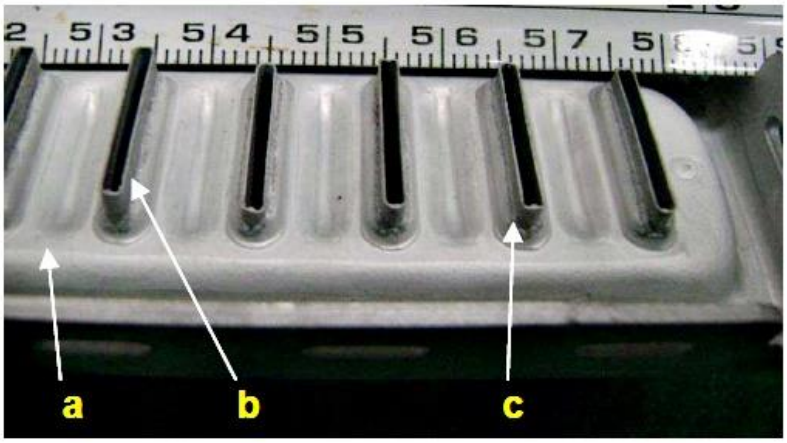


**Figura 2.14** Ensamble del intercambiador de calor (a) Cabezal Al 3005 (b) Tubo plano 3003 (c) soldadura AW 4343. *[21]*

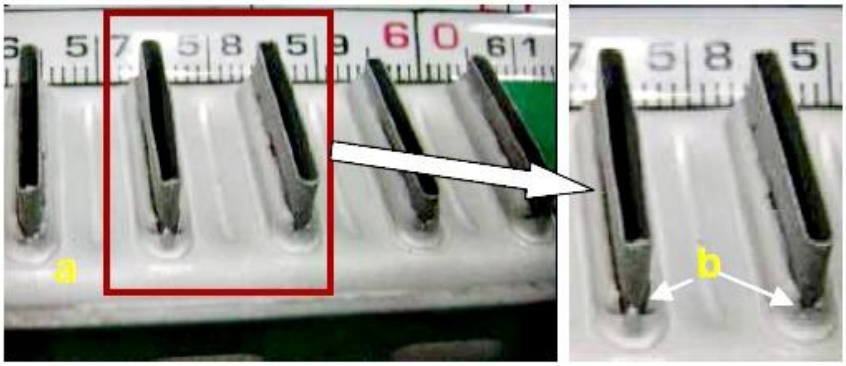


**Figura 2.15** Aspecto general de las indicaciones relevantes (a) Unión de cabezal y tubo plano (b) discontinuidades en soldadura. *[21]*

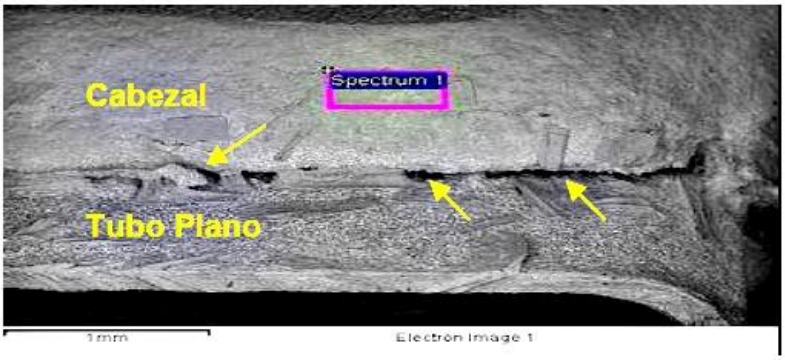


**Figura 2.16** Discontinuidades (flechas) presentes en área de soldadura del cabezal y tubo plano. *[21]*

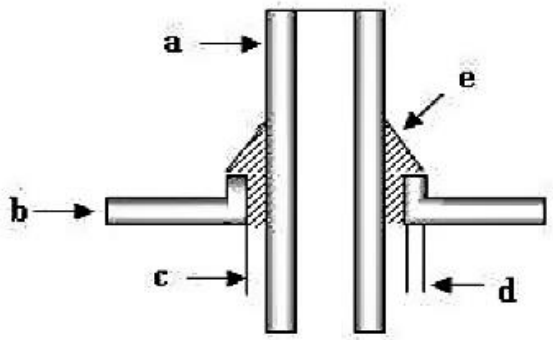


**Figura 2.17** Diseño de unión (a) Cabezal, (b) Tubo Plano,(c) espaciamiento, (d) pared a 90° del cabezal. (e) soldadura. *[21]*

El análisis microestructural de las uniones se realizó en las secciones transversales de las muestras representativas tal como se muestra la ***Figura 2.17*** y ***Figura 2.18***. Los resultados de esta investigación muestran una microestructura rica en aluminio con discontinuidades (***Figura 2.19***) presentes en la unión, las cuales fueron identificadas como fusión incompleta de la soldadura; mostrando una red de intermetálicos Al-Si en forma de agujas y cuboidales en una matriz dendrítica. Al modificar las variables de tiempo y temperatura de soldadura se obtuvo una microestructura dendrítica en una solución sólida α – Al, 7.5%e.p. de Si., manteniendo al mínimo la presencia de zonas de fusión incompleta. [21]

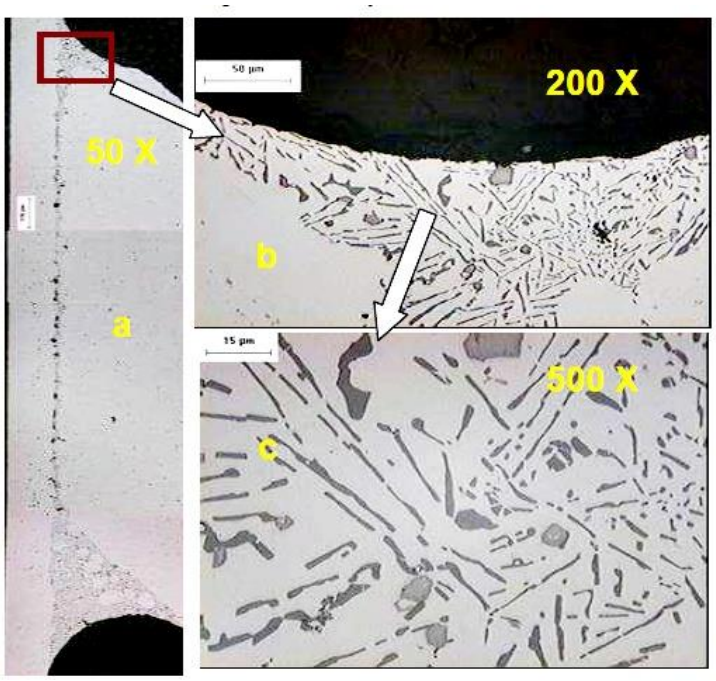


**Figura 2.18** Microestructura de la soldadura. (a) Mapeo de la sección transversal de la soldadura, 50X. (b) Soldadura compuesta por una matriz dendrítica (c) Trazas de ínter metálicos Al-Si-Mg en forma de agujas compuesta por Al Si *[21]*

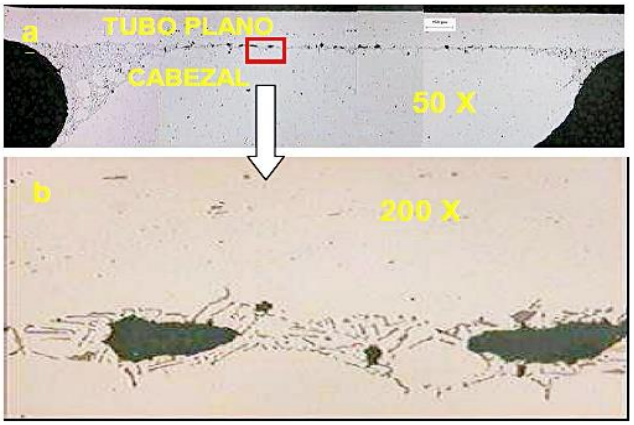


**Figura 2.19** Microestructura de la soldadura. (a) Mapeo de la soldadura en la sección transversal 50X. (b) Acercamiento a las discontinuidades del tipo rechupes 200X. *[21]*

Durante los últimos años el estudio basado en aleaciones de aluminio tiene que ver con el desarrollo de metales de relleno de bajo punto de fusión para

soldar aleaciones de aluminio de diversas series tanto símiles como disímiles. En 2009 CHUANG y col., del instituto de Ciencia de los Materiales e Ingeniería de la Universidad Nacional de Taiwán, reportaron análisis térmicos de una serie de metales de relleno de Al-Si-Cu-Sn y las microestructuras observadas correspondientes. [28]

Las principales microestructuras de las aleaciones Al-Si-Cu en este estudio consistían en una solución sólida de α-Al, partículas de silicio, el intermetálico $CuAl_2$ (θ) y estructuras eutécticas de Al-Si, Al-Cu y Al-Si-Cu. Para seguir mejorando la soldabilidad de los metales de relleno, se añadió magnesio como un agente humectante, que ayuda a eliminar el oxígeno residual y la humedad de la superficie de aluminio con soldadura fuerte y reducir la película de óxido.

Basándose en los resultados obtenidos de los análisis térmicos, se propone en este estudio un nuevo metal de aporte con la composición de Al-7Si-20Cu-2Sn-1Mg que posee una rango de temperatura de fusión de 501 a 522 °C y una microestructura que incluye una solución sólida de Al-Si, partículas de silicio, una fase rica en estaño y los compuestos intermetálicos $CuAl_2$, $CuMgAl_2$ y $Mg_2Si$. Cuando se utiliza este metal de aporte para soldar la aleación de aluminio 6061-T6, se logró fuerza de unión de 196 +/-19 MPa.

Con el fin de desarrollar un punto de fusión bajo y una alta resistencia en el metal de relleno para la soldadura fuerte de aleaciones de aluminio, una serie de aleaciones de Al-Si-Cu con las composiciones mostradas en la ***Tabla 2.18*** se prepararon por fusión en crisoles de alúmina equipadas con un horno de aire. [28]

**Tabla 2.18** Composiciones químicas y propiedades térmicas de metales de relleno usados para unión mediante soldadura fuerte. *[28]*

| | Composición química | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | % e.p. | | *TS** | *TL** | *DT** |
| Sample | Si | Cu | Sn | Al | (°C) | (°C) | (°C) |
| 1 | 12 | 0 | 0 | *bal | 579 | 593 | 14 |
| 2 | 11.4 | 5 | 0 | bal | 523 | 579 | 56 |
| 3 | 10.8 | 10 | 0 | bal | 522 | 565 | 43 |
| 4 | 10.2 | 15 | 0 | bal | 523 | 548 | 25 |
| 5 | 7 | 15 | 3 | bal | 504 | 545 | 41 |
| 6 | 9.6 | 20 | 0 | bal | 524 | 543 | 19 |
| 7 | 9 | 25 | 0 | bal | 523 | 537 | 14 |
| 8 | 8.4 | 30 | 0 | bal | 523 | 534 | 11 |
| 9 | 7.8 | 35 | 0 | bal | 522 | 558 | 36 |
| 10 | 7.2 | 40 | 0 | bal | 523 | 572 | 49 |
| 11 | 7 | 20 | 2 | bal | 504 | 526 | 22 |
| 12 | 7 | 20 | 2Sn-1Mg | bal | 501 | 522 | 21 |
| 13 | 7 | 20 | 3 | bal | 504 | 526 | 22 |
| 14 | 9 | 20 | 5 | bal | 504 | 523 | 19 |
| 15 | 8.4 | 20 | 10 | bal | 504 | 520 | 16 |

*TS indica las temperaturas solidus de los metales de aporte. TL indica las temperaturas liquidus de los metales de aporte. DT*= TL-TS.

Las aleaciones Al-Si se fundieron por primera vez en 700 °C, y luego su temperatura se elevó a 1000 °C cuando se añadieron diversas cantidades de cobre (99.9 por ciento en peso) en la aleación de aluminio fundido. Después, la mezcla se agitó durante 30 minutos para la homogeneización. Algunas aleaciones de Al-Si-Cu se añadieron con otros elementos como estaño y magnesio. Luego fueron añadidos en un molde de acero inoxidable.

Los análisis térmicos para diferentes metales de relleno (20 mg ) fueron realizados con un modelo DU PONT 2000 diferencial en un rango de temperatura de la temperatura ambiente hasta 600°C, a una velocidad de calentamiento de 10°C/min usando una atmósfera de argón. [28]

Su microestructura fue observada por microscopio óptico de escáner de electrones después de la preparación metalográfica al agua fuerte en un 10% de $H_3PO4$. Las fases presentes fueron obtenidas por difracción de rayos x (DRX),

espectrómetro de energía dispersiva de rayos x y mediante un microanalizador de sonda de electrones (EPMA)

Finalmente, la aleación de aluminio 6061-T6 en forma de varillas con un diámetro de 12 mm se soldó en un horno de vacío con el metal de relleno desarrollado en este estudio. Para la comparación, también usaron un metal de relleno convencional Al-12SI. El proceso de soldadura se realizó a través de un horno de vacío a $5X10^{-5}$ torr para diversas muestras, respectivamente, en 550°C, 575°C, y 600°C durante 30 o 60 minutos.

Los resultados de esta investigación en cuanto a sus análisis térmicos (***Figura 2.21*** **)** se muestran las curvas DTA para varios tipos de materiales de aporte usados en este estudio. Las temperaturas de fusión (solidus y liquidus) fueron tomadas de las curvas DTA y listadas en la ***Tabla 2.18*****.**

Dado que el proceso de calentamiento en el análisis DTA estaba en una condición de no equilibrio, la aleación eutéctica Al-12SI mostró un rango de temperatura de fusión de 579 a 593°C, y en lugar del punto eutéctico de equilibrio a 577°C, mostró dos estructuras distintas, según lo observado en la aleación Al12SI: una estructura eutéctica de Al-Si lamelar y solución sólida de Al-α en forma de dendritas (mostrado en la ***Figura 2.20*** como grandes áreas blancas). [28]

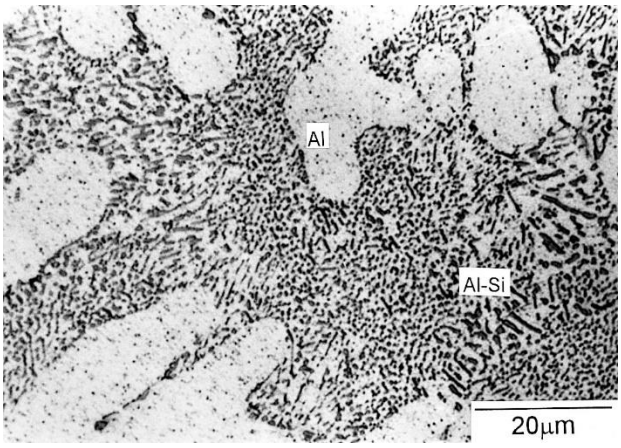


**Figura 2.20** Microestructura de la aleación eutéctica de Al-12SI, en condiciones de calidad. *[28]*

La adición de cobre al 5 % a la aleación Al-12SI causó que la temperatura solidus cayera drásticamente de 579 a 523°C. A medida que el contenido de cobre aumentó a más del 40 %, la temperatura se mantuvo constante. Sin embargo la temperatura liquidus de estas aleaciones ternarias de Al-Si-Cu disminuyó de 593 a 534°C cuando se añadió cobre hasta un 30%.

Dos picos endotérmicos se encontraron en la curva DTA de la aleación Al11.4Si-5Cu (***Figura 2.21***), lo que corresponde al punto eutéctico ternario Al-Cu-Si y Al-Cu punto eutéctico binario en 527°C y 542°C, respectivamente. Además el diagrama DTA muestra que al aumentar el contenido de cobre de 0% hasta 25 % causó los picos endotérmicos se aproximen entre sí. Para la aleación Al-9Si-25Cu, que estaba cerca de la composición eutéctica ternaria Al-5.2Si-26.7Cu, sólo una reacción endotérmica se encontró en la curva DTA cuando la adición de cobre fue 35 %, sin embargo cuando se aumentó a 40 % dos picos endotérmicos separados en la curva DTA aparecieron de nuevo. Para el desarrollo de un bajo punto de fusión de la aleación Al-Si-Cu, el contenido de cobre, sugiere este estudio usar el Cu en un rango de entre 20 a 30 %.

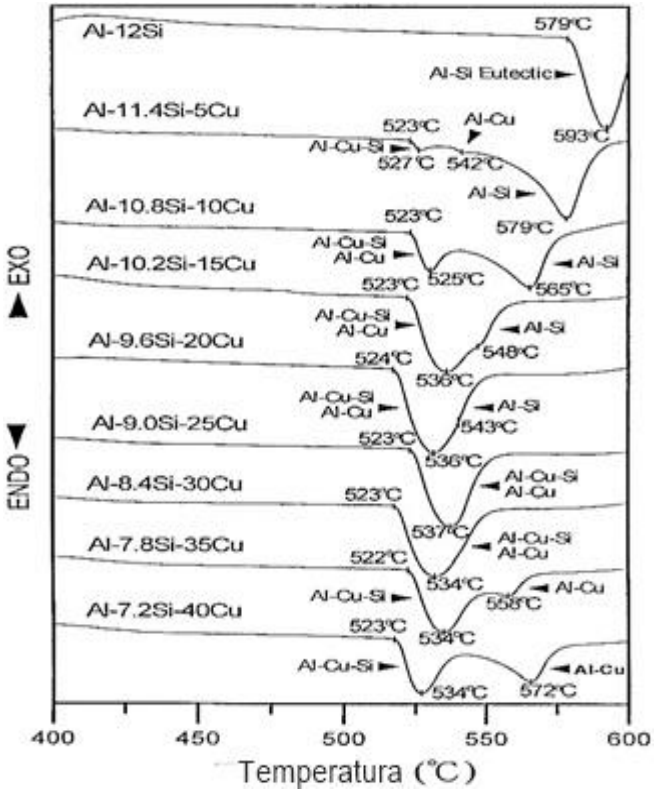

**Figura 2.21** Curvas DTA de la aleación Al-12Si y los metales de aporte Al-Si-Cu. *[28]*

La microestructura de la aleación ternaria Al-11.4Si-5Cu estaba compuesta por una fase eutéctica de Al-Si, una solución sólida Al-α, y el compuesto intermetálico $CuAl_2$ (θ) (***Figura 2.22*** (a)). Cuando el contenido de cobre en las aleaciones Al-Si-Cu fue superior al 10 %, algunas partículas de silicio (tamaño medio sobre 25 mm) combinada con una fase eutéctica de Al-Si que les rodeaba podría ser detectado (b). [28]

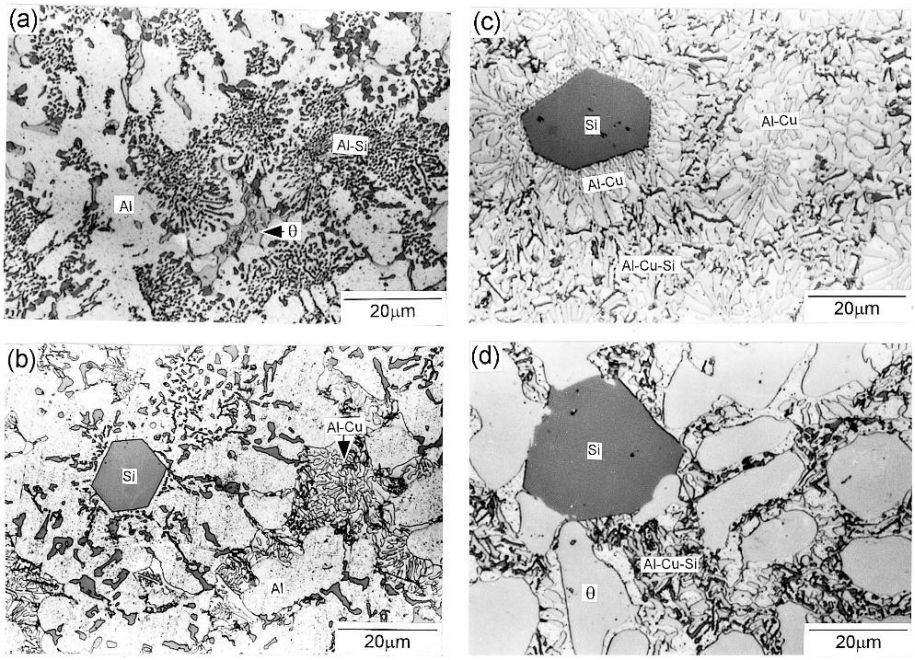


**Figura 2.22** Microestructuras de los metales de aporte de Al-Si-Cu, en condiciones de fundición: (a) Al-11.4Si-5Cu, (b) Al-10.8Si-10Cu, (c) Al-9.0Si-25Cu, y (d) Al-7.8Si-35Cu. *[28]*

La escala del eutéctico Al-Si se redujo, junto con el aumento del contenido de cobre. Para la microestructura de la aleación de Al-9Si-25Cu (c), la fase eutéctica de Al-Si y la solución sóida dendrítica Al-α desapareció, sustituido por la estructura eutéctica de Al-Cu, la solución solida eutéctica ternaria Al-Cu-Si y el compuesto intermetálico $CuAl_2$ el cual es compuesto intermetálico que se vio aumentado junto con el creciente contenido de cobre, lo que provocó que la

aleación se volviera frágil y por lo tanto bajó su resistencia a la corrosión. Por esta razón, la concentración de cobre en el metal de relleno desarrollado debe fijarse en alrededor del 20 pct. [28]

Para las aleaciones cuaternarias Al-Si-Cu-Sn ( ***Figura 2.23***) se muestran las curvas DTA, en el cual un pico endotérmico apareció en 232°C en las curvas de aleaciones de Al-Si-Cu-Sn con el contenido de estaño superior a 3 %, que correspondía al punto de fusión del estaño. Se da a entender que la fase de estaño puro es retenida en este tipo de aleaciones. Otro pico endotérmico aparece a 504°C, el cual se atribuye a la reacción eutéctica Al-Cu-(-Si-Sn). [28]

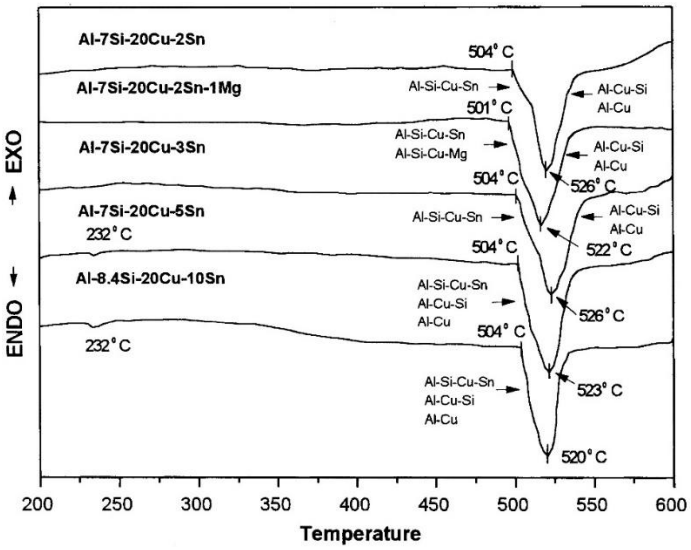


**Figura 2.23** Curvas 5-DTA de Al-Si-Cu-Sn (Mg) metales de relleno. *[28]*

Las microestructuras observadas se muestran en la ***Figura 2.24*** (a y b) en donde se confirma una matriz de una fase pura de estaño, una fase $CuAl_2$, partículas de silicio, y la reacción eutéctico Al-Cu, Al-Si-Cu, y las fases de Al-Si-Cu-Sn. Las temperaturas de solidus y liquidus obtenidos a partir de las curvas de DTA.

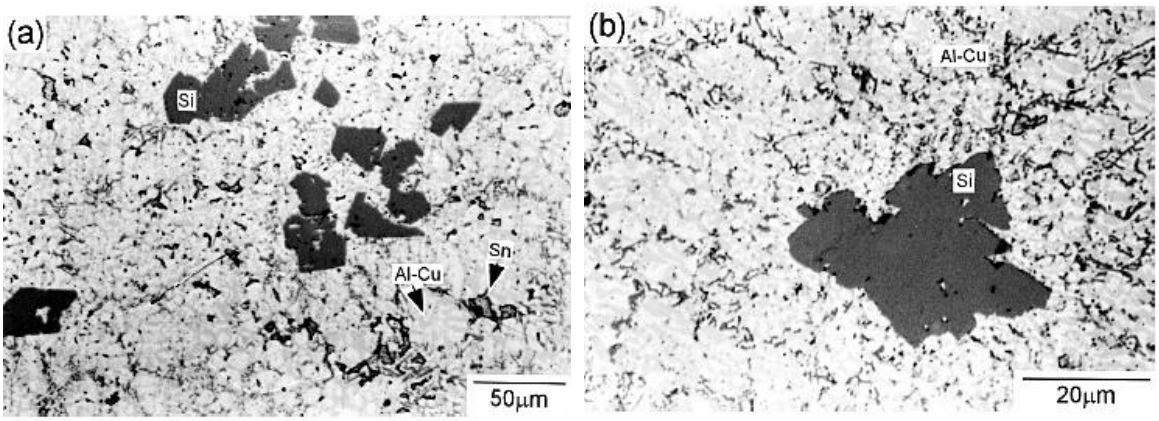


**Figura 2.24** Microestructuras de metales de aporte de Al-Si-Cu-Sn, en condición de casting: (a) Al-9Si-20Cu-5SN y (b) Al-8.4Si-20Cu-10Sn. *[28]*

En la ***Figura 2.25*** se muestra la microestructura de esta aleación, que contenía partículas de la fase de estaño y de silicio puro. Consistente con la observación microestructural el pico endotérmico a 232°C que desapareció en la curva DTA de esta aleación.

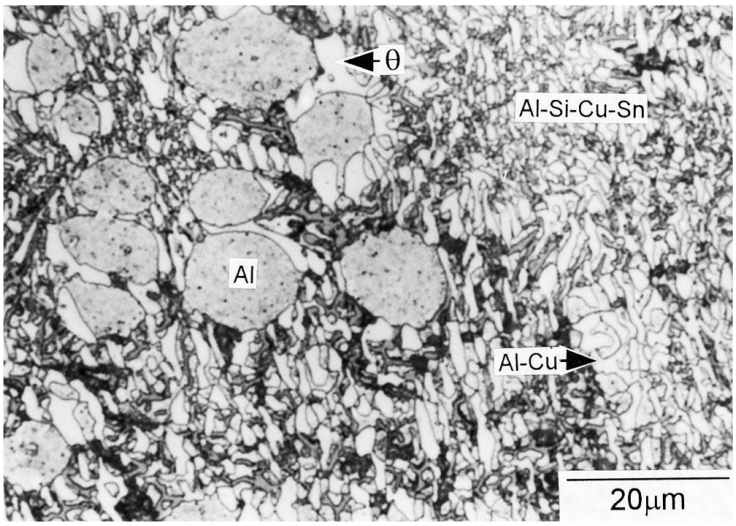


**Figura 2.25** Microestructura de los metales de aporte en fundición Al-7Si-20Cu-2Sn. *[28]*

Para mejorar la soldabilidad de este metal de aporte, se añadió 1 % de magnesio en la aleación Al-7SI-20Cu- 2Sn. En el cual el magnesio actuaba como

un agente humectante eliminando el oxígeno residual y la humedad en la soldadura fuerte sobre la superficie de aluminio y reduciendo así la película de óxido. La composición final del metal de relleno desarrollado era Al-7Si- 20Cu-2Sn-1mg, que poseía un intervalo de fusión de 501 a 522°C (que se muestra en la ***Figura 2.23***). La microestructura de este aleación como se muestra en la ***Figura 2.26*** contenía una solución sólida α-Al, partículas finas de silicio, una fase de estaño puro y $CuAl_2$, $CuMgAl_2$, y compuestos intermetálicos $Mg_2Si$. Los picos de DRX confirmaron las fases como se observa en la microestructura de este metal de relleno Al-7SI-20Cu-2Sn-1Mg. En la ***Figura 2.27***, análisis de DRX para Al-9.6Si-20Cu y Al-7Si y metales de aporte 20Cu-2SN también fueron incluidos, que también eran consistentes con los resultados de DTA y observaciones microestructurales para ambas aleaciones.

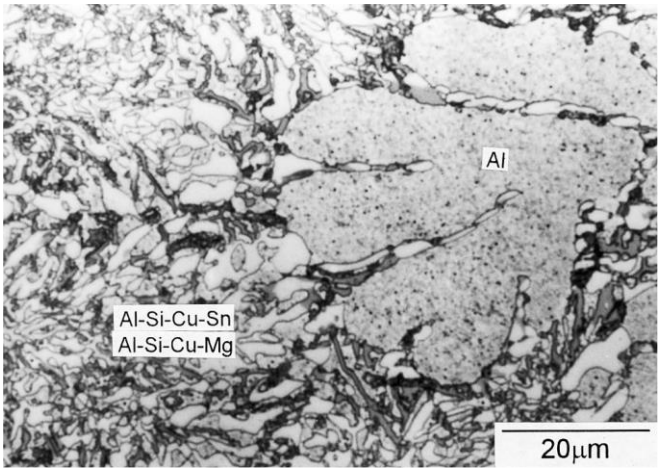


**Figura 2.26** Microestructura del material de aporte en fundición Al-7Si-20Cu-2Sn-1Mg. *[28]*

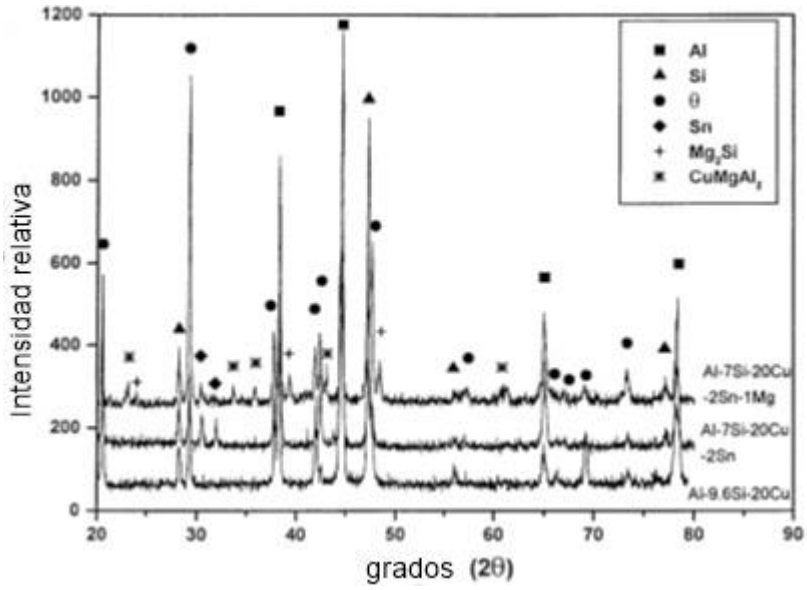


**Figura 2.27** XRD para los picos de los metales de relleno en este estudio. Al-Si-Cu-(Sn, Mg). [28]

En la **Figura 2.28** se muestra la microestructura de la unión donde una aleación de aluminio 6061-T6 se suelda con Al-7SI-20Cu-2Sn-1Mg a 550°C durante 30 minutos. Los Mapeos EPMA en la **Figura 2.28** revelaron que el contenido de aluminio de la junta a tope disminuyó después de la soldadura. En la **Tabla 2.19** se muestra la fuerza de unión de la aleación 6061-T6 mediante soldadura fuerte con diferentes metales de aporte. [28]

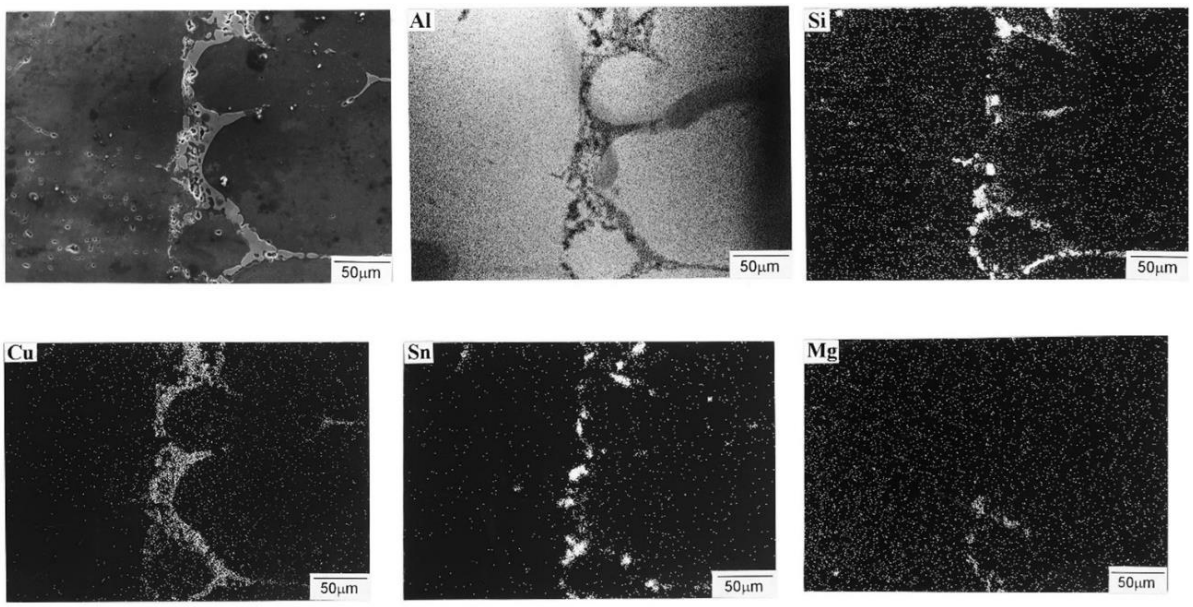


**Figura 2.28** Mapeo por elemento EPMA de la junta a tope 6061-T6 soldada con Al-7SI-20Cu-2Sn-1Mg como metal de aporte a 550°C durante 30 min. . *[28]*

**Tabla 2.19** Fuerza de unión de la aleación 6061-T6 mediante soldadura fuerte con los metales de aporte Al-12Si y Al-7Si-20Cu-2Sn-1Mg. *[28]*

| Metal de aporte. | Condiciones Unión. | *Tratamiento Térmico. | Fuerza de (MPa). | Origen de Fractura. |
|---|---|---|---|---|
| Al-12Si | 600°C, 30 | — | 59 +/- 18 | junta a |
| Al-12Si | 600°C, 60 | T6 | 67 +/- 7 | junta a |
| Al-7Si-20Cu-2Sn- | 550°C, 30 | — | 74 +/- 10 | junta a |
| Al-7Si-20Cu-2Sn- | 575°C, 30 | — | 83 +/- 7 | junta a |
| Al-7Si-20Cu-2Sn- | 600°C, 30 | — | 95 +/- 9 | junta a |
| Al-7Si-20Cu-2Sn- | 550°C, 60 | T6 | 147 +/- 12 | junta a |
| Al-7Si-20Cu-2Sn- | 600°C, 60 | — | 109 +/- 15 | junta a |
| Al-7Si-20Cu-2Sn- | 600°C, 60 | T6 | 196 +/- 19 | junta a |

* Condición del tratamiento T6: solución tratada a 520°C durante 1.5 horas tratado en agua templada, y luego envejeció a 175°C durante 8 horas. ** La resistencia última a la tracción de la aleación de Al 6061-T6 para las pruebas de soldadura fuerte fue 331 MPa.

El agotamiento de aluminio fue reemplazado por el enriquecimiento de elementos de cobre. Los elementos de Si y Sn aparecieron como grupos de compuestos intermetálicos que contienen Al y Mg. Cuando se compara con el

análisis de DRX en la ***Figura 2.27*** esto implica que la composición de Al-7SI-20Cu-2Sn-1Mg, en este metal de relleno había cambiado mucho durante la reacción de soldadura con la aleación 6061-T6.

En este estudio se concluyó que las temperaturas de solidus de las aleaciones Al-Si-Cu disminuyeron con el aumento de cantidad de cobre. Sin embargo, la temperatura de liquidus se redujo de 593 a 534°C con la adición de cobre de 0 a 30 % y luego subieron al incrementar el contenido de cobre mayor a 35 %.

La microestructura de las aleaciones de Al-Si-Cu consistió en la estructura eutéctica de Al-Si, la solución sólida α-Al dendrita y la fase $CuAl_2$ (θ). Para las aleaciones cuaternarias Al-Si-Cu-Sn, la microestructura contenía una fase pura de estaño, una fase $CuAl_2$, partículas de silicio, y eutéctico Al-Cu, Al-Si-Cu, y las fases de Al-Si-Cu-Sn. Las temperaturas de fusión de las aleaciones Al-Si-Cu se redujo 20°C con la adición de 2 % estaño.

Cuando se empleó el relleno recién desarrollado de metal Al-7SI-20Cu-2Sn-1Mg para soldar una aleación 6061-T6 a 600°C durante 60 minutos, y después sometiéndola a un tratamiento T6, la resistencia de la unión era 196 +/- 19 MPa. Sin embargo, la resistencia de la unión era solamente 67 +/- 7 MPa para la aleación 6061-T6 cuando fue soldada con el relleno Al-12SI convencional de metal bajo las mismas condiciones de unión. [28]

Actualmente la comprensión de los parámetros clave de la soldadura fuerte al vacío de aleaciones de aluminio se basa en el diseño adecuado de las uniones de soldadura, desde la limpieza a una correcta fijación de las piezas; el mantenimiento de los hornos al vacío y la fácil reproducción de parámetros. En 2014 Craig Moller, Jim Grann Ipsen y Cherry Valley de llinois EUA, miembros de la American Welding Society (AWS); reportaron en un artículo de la revista ADVANCED MATERIALS & PROCESSES, un estudio de parámetros en soldadura fuerte en horno al vacío de aleaciones de aluminio

El estudio menciona que la soldadura al vacío de aluminio (Vacuum aluminum brazing, VAB por sus siglas en inglés) se realiza en un horno de vacío y se considera soldadura fuerte sin fundente porque el flujo no se utiliza para crear las uniones y crea un ambiente limpio que no lo requiere, sin embargo es común usar magnesio como un aditivo en la soldadura de aluminio al vacío para mejorar propiedades mecánicas. La soldadura fuerte sin fundente es un proceso que puede ser realizado utilizando atmósferas de gases inertes en hornos de vacío. Ejemplos de aplicación incluyen la fabricación de semiconductores [29]

En cuanto a beneficios de usar atmósferas controladas en soldadura fuerte los estudios informan que permite un control más preciso de las tolerancias debido a que los materiales se calientan y se enfrían uniformemente en comparación con los procesos de unión localizados y proporciona una unión limpia sin la necesidad de acabado adicional, además reduce las concentraciones de esfuerzos y mejora de las propiedades de fatiga y resistencia a la tensión. VAB también crea una unión herméticamente sellada continua. El endurecimiento puede llevarse a cabo en el mismo ciclo en el horno si se utilizan aleaciones tratables térmicamente y el sistema de horno tiene un sistema de enfriamiento forzado, lo que reduce el tiempo de ciclo. [29]

El proceso VAB es típicamente un ciclo relativamente corto debido a las características de bombeo y calentamiento rápido del horno, una excelente uniformidad de temperatura y alta conductividad térmica de las piezas de aluminio que se suelda. La ***Figura 2.29*** muestra un ciclo típico de VAB.

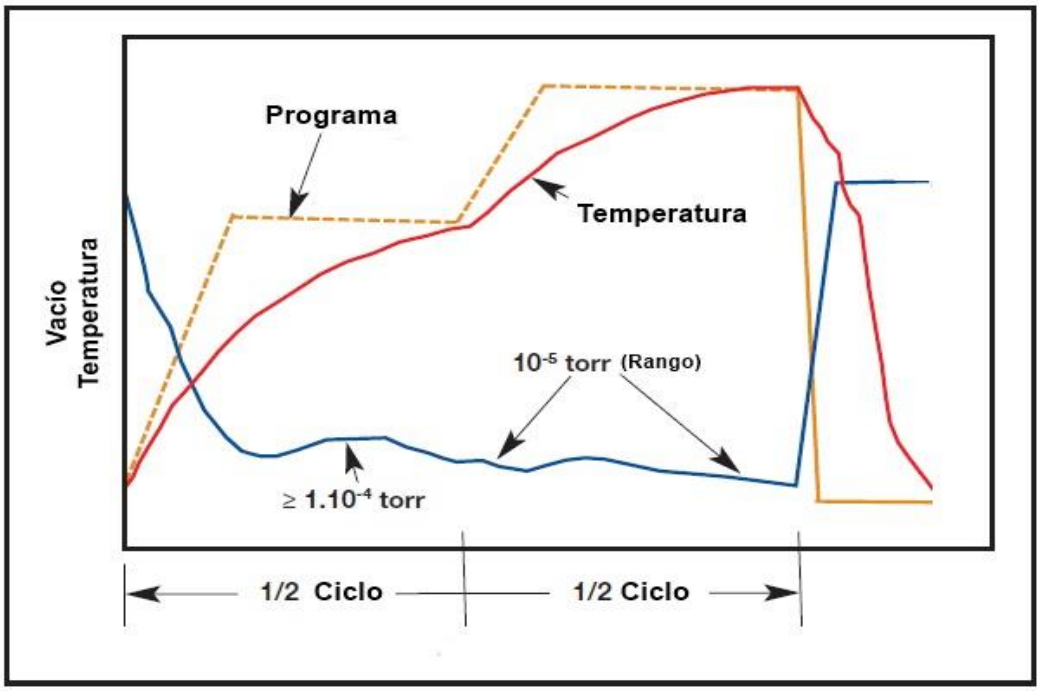


**Figura 2.29** Ciclo típico de VAB. [29]

Capacidad de bombeo de vacío debe dimensionarse adecuadamente para minimizar el tiempo de inactividad de la bomba de una nueva carga a un nivel de vacío profundo. Esta desgasificación tiene lugar debido a la vaporización de magnesio. El nivel de vacío profundo es un parámetro de proceso importante porque asegura un ambiente relativamente puro para la soldadura fuerte (menos ppm de oxígeno).

El magnesio juega un papel clave en los procesos de VAB debido a que se usa como aditivo para el metal de relleno y/o metal base de las piezas a soldar. El magnesio se vaporiza a aproximadamente 1.058 ° F (570 ° C) y actúa como un "atrapante" para el oxígeno y vapor de agua, mejorando así la pureza de vacío soldadura fuerte. [29]

El magnesio reduce el óxido de alúmina en la superficie del aluminio y crea una humectación uniforme acelerada de las superficies de union. Las siguientes reacciones (***Figura 2.30***) se producen durante el proceso de soldadura al vacío:

$$Mg + H_2O \rightarrow MgO + H_2$$
$$Mg + O_2 \rightarrow 2\ MgO$$
$$3\ Mg + Al_2O_3 \rightarrow 3\ MgO + 2\ Al$$
$$Mg + N_2 \rightarrow Mg_3N_2$$

**Figura 2.30** Reacciones durante el proceso de soldadura al vacío. [29]

. La ***Figura 2.31*** muestra que las tasas de calentamiento más lentas reducen la velocidad de vaporización de magnesio. Debido a esta carga de gas, las bombas de vacío deben dimensionarse adecuadamente para mantener un buen vacío de trabajo ($10^{-4}$ hasta $10^{-5}$ torr), además es importante controlar el rango de temperaturas y la uniformidad los cuales son parámetros del proceso importantes.

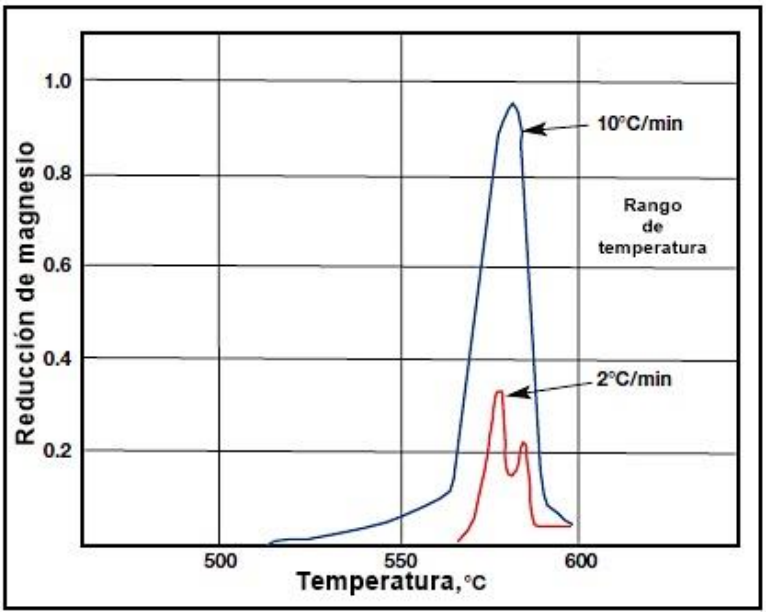


**Figura 2.31** Reducción de magnesio conforme la temperatura. *[29]*

La uniformidad de la temperatura aceptada durante un ciclo de soldadura fuerte es de +/-5 °F (+/-3 °C) del punto de ajuste, la soldadura de aluminio tiene un rango muy estrecho de temperaturas de soldadura fuerte aceptable. La regla que rige para la soldadura fuerte de aluminio es que el metal de aporte debe llegar a su fusión antes de que el metal de base alcance su temperatura de solidus. Esta diferencia de temperatura puede ser tan pequeño como 10°-18 °F (5°-10°C).

La ***Figura 2.32*** muestra el rango de temperaturas recomendado para soldadura fuerte de aluminio. Por ejemplo, una metal base de aleación 6061 T6 tendrá una temperatura solidus de 1.099 °F (593 °C) y una temperatura liquidus de 1.206 ° F (652 ° C). La gama de temperaturas para soldadura fuerte sería 1049 ° -1085 °F (565 ° -585 ° C) dependiendo del metal de relleno utilizado. [29]

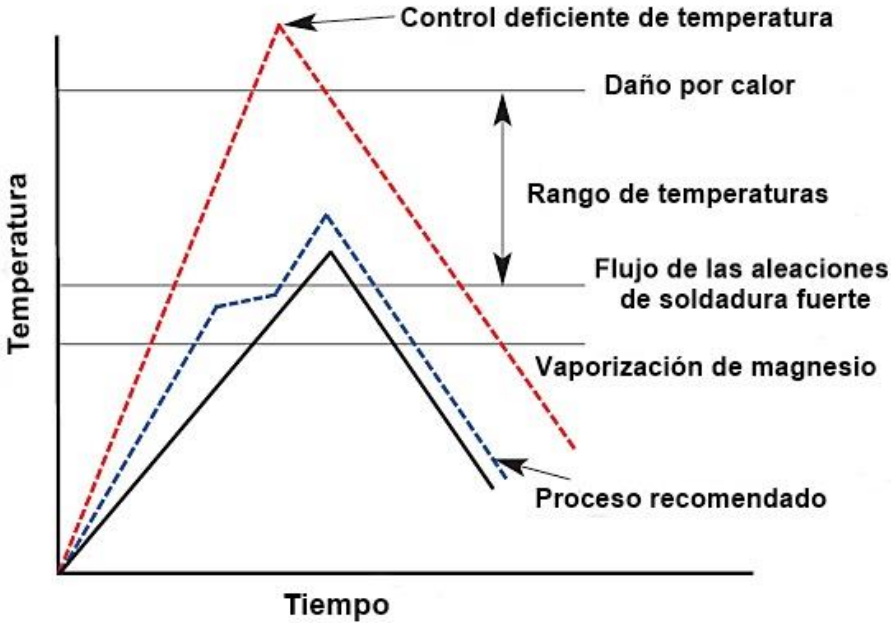


**Figura 2.32** Proceso recomendado de soldadura fuerte en horno al vacío. [29]

El uso de una etapa de calentamiento a una temperatura justo por debajo del punto de solidus el metal de aporte asegura que todas las piezas y uniones a soldar alcanzaran la temperatura correcta en aproximadamente el mismo tiempo. En este momento, la rampa de temperatura de la soldadura fuerte se inicia y el

metal de aporte comienza a derretirse humectando por capilaridad las uniones y al enfriar se produce la soldadura fuerte

El tiempo de duración de la temperatura de soldadura fuerte se debe mantener a un mínimo debido a que el metal de aporte fundido se vaporiza en el vacío profundo mientras trata de humedecer las uniones. El exceso de pérdida de metal de aporte debido a vaporización podría producir una humectación de uniones pobres lo cual tendría como repercusión la pérdida de fuerza de unión y la capacidad de sellado. Después la temperatura de soldadura se completa con un ciclo de enfriamiento por vacío e inmediatamente después se solidifica el metal de relleno de soldadura fuerte en las articulaciones y se detiene la vaporización de material. [29]

En la ***Figura 2.33*** se muestran las uniones de soldadura fuerte típicas utilizadas en la construcción de componentes de aluminio. En general, la diferencia entre los tipos favorables y desfavorables de las articulaciones es la cantidad de solapamiento que resulta en buenas juntas de soldadura fuerte. Una unión soldada más fuerte tiene una gran área de superficie humedecida por el material de relleno.

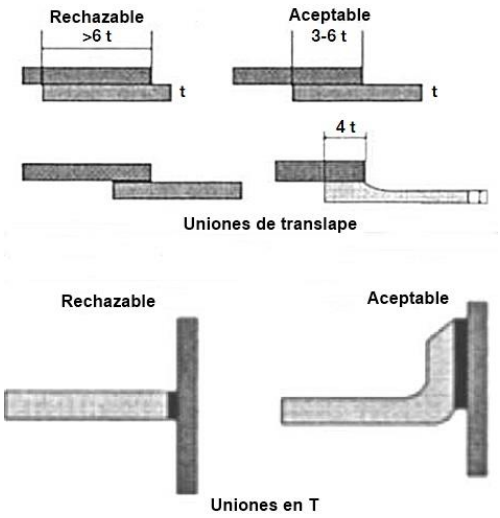


**Figura 2.33** Tipos de uniones en soldadura fuerte. [29]

El exceso de superposición es perjudicial para la unión debido a que el material de aporte no cubrirá la totalidad superficial cuando fluya en la unión.

Además cabe mencionar que la resistencia de la unión depende de dos características mecánicas primarias: la buena mojabilidad del área de superficie y el tamaño de la brecha en el que fluye el metal de aporte. Junto con el diseño adecuado de las articulaciones y fijación, la soldadura fuerte requiere de piezas con una limpieza adecuada antes del montaje y luego se deben de manejar adecuadamente a fin de evitar contaminación antes de la soldadura. Todos los contaminantes como grasa, aceite, y partículas deben limpiarse de las superficies metálicas de los metales base y de metales de aporte y debe tenerse cuidado al momento de montarlas con la finalidad de no transferir los aceites de su piel a estas superficies al apilar piezas de unión. Métodos de limpieza típicas incluyen desengrasado con vapor, lavado de hidrocarburos, lavado acuoso, ácido, aguafuerte, y extracción de aceite al vacío. Sin embargo otro punto de relevante importancia es la brecha adecuada entre las piezas a unir. En la ***Figura 2.34*** se muestra que las brechas entre 0.003 y 0.008 in (0.08 hasta 0.2 mm) funcionan mejor para soldadura por horno de vacío y tienen mayor fuerza de tracción. [29]

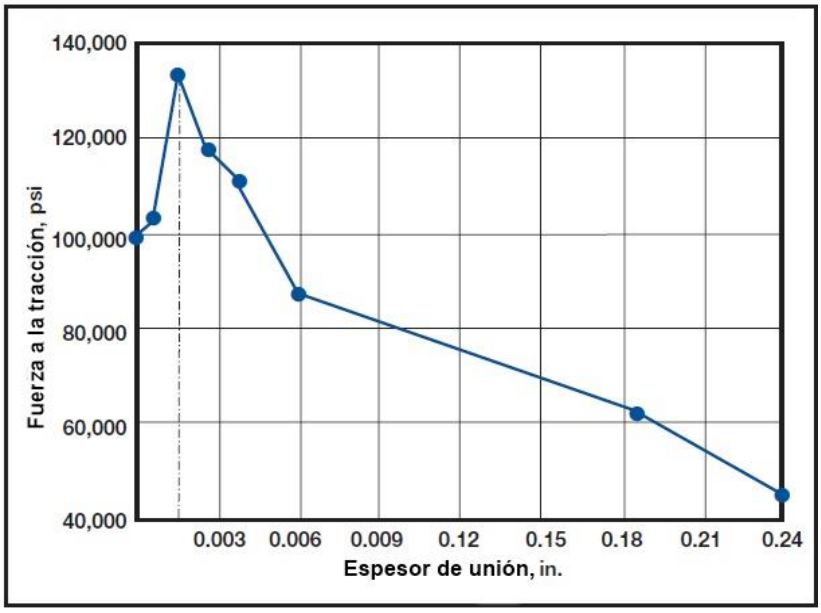


**Figura 2.34** Fuerza de unión y espesor de unión [29]

## 2.11 Componentes de aluminio en la industria automotriz

El aluminio en la fabricación de automóviles tiene su origen en la utilización de este material para desarrollar diferentes elementos mecánicos. Su uso más generalizado se centraba en la fabricación de bloques de motor, culatas, elementos de refrigeración, riness, cunas de motor, entre otros, por su fácil mecanización, ligereza, buen comportamiento frente a la corrosión con el oxígeno y sus buenas cualidades para la evacuación de calor de dichos elementos. [30]

Una carrocería de automóvil fabricada en aluminio en lugar de acero, puede reducir el peso alrededor de 100 a 150 kg. El bajo peso en el automóvil es un factor muy importante ya que cada 100 kilogramos de reducción de peso en un automóvil suponen una reducción del consumo en torno a 0.35 litros cada 100 kilómetros, y unas emisiones de $CO_2$ de 8.8 gramos menos por kilómetro.

Con 2700 kg/m$^3$ la densidad del aluminio es un tercio de la del acero, pero esta reducción de peso rara vez se logra ya que para un gran número de partes es necesario aumentar el espesor promedio de aluminio en comparación con el acero para lograr las características de esa misma parte.

La razón mas frecuente de espesor en aplicaciones estructurales es de 1.5 aproximadamente, lo que significa que por ejemplo, que un componente de 0.8 mm de acero puede ser reemplazado por un componente de aluminio de 1.2 mm, en este caso la reducción en peso sigue siendo de 50%.Sin embargo, la relación entre las propiedades del material, la fuerza de rigidez y el peso de un componente es muy compleja y puede estar influenciada por la geometria de la pieza de modo que no hay una regla absoluta. . [28]

# CAPÍTULO 3 Análisis y discusión de la bibliografía.

Las aleaciones de aluminio 6061 T6 y 7075 T6 durante el proceso de soldadura fuerte en horno al vacio se ven afectadas en sus propiedades mecánicas debido a las temperaturas y tiempo de permanencia. Sin embargo, las zonas afectadas por el calor presentan un considerable aumento en la dureza y en sus propiedades de tensión esto se debe a la disminución de micromecanismos de falla los cuales están directamente relacionados con el calor de entrada y el tiempo de permanencia en el horno de soldadura ya que este proceso de unión se caracteriza por calentar al metal de aporte a su temperatura de fusión fluyendo por capilaridad, entre la holgura que existe entre los materiales a soldar y uniendo sus superficies por atracción atómica y mediante difusión.

De acuerdo con la bibliografia, la resistencia de las aleaciones de aluminio se ve afectada principalmente en la zona de soldadura debido a su composición química ya que los elementos que influyen en la resistencia al material base son el magnesio y el silicio. El silicio es un elemento de vital importancia debido a que propicia que el aluminio baje su punto de fusión, de esta manera los elementos Al y Mg no llegan a su punto de fusion, además de que controla la formación de compuestos intermetálicos; ambos elementos son sometidos a una reacción de precipitación formando el percipitado $Mg_2Si$ el cual se encuentra en la zona de unión debido a la composicion química del material de aporte que puede; variar entre los

más usados son BAlSi-2, BAlSi-3 y BAlSi-4 (4343,4145,4047 conforme la AWS) los cuales se componen de Al y del 5-15%Si.

Los precipitados que se forman de magnesio sobre la superficie de unión y que pueden difundir hasta el metal base, se logran por la difusión y la capilaridad caracterizada del proceso de soldadura fuerte en horno y se presenta distribuido en altas cantidades, lo cual da como resultado una mejora en las propiedades de resistencia a la tensión y una mayor dureza en la zona de soldadura en comparación con la del metal base.

## 3.2 Formación de fases intermetálicas

La formación de una microestructura rica en aleaciones de aluminio suelen dar como resultado discontinuidades presentes en la unión, conocidas como fusión incompleta de la soldadura e identificadas por la formación de intermetálicos de Al-Si en forma de agujas y cuboidales en una matriz cúbica. Sin embargo al modificar las variables de tiempo y temperatura, la microestructura tiende a cambiar a microestructuras dendríticas de soluciones sólidas de α – Al, 7.5%e.p. de Si., manteniendo al mínimo la presencia de zonas de fusión incompleta.

La aplicación del proceso de soldadura fuerte en horno de atmósfera controlada produce la formación de compuestos intermetálicos en las uniones aluminio las cuales son fases frágiles y duras, sin embargo suelen encontrarse dispersas en la zona de unión de soldadura, lo cual influencía directamente en la mejora de las propiedades mecánicas por lo que cuando se realizan ensayos de tensión, la ruptura ocurre en la zona del metal base, indicando que la zona de soldadura tiene mayor resistencia a la tensión.

Una variable esencial a controlar es la temperatura, por lo cual se debe evitar que los materiales lleguen a su temperatura de fusión, debido a esto es importante

escoger materiales de aporte que contengan silicio y elementos aleantes, principales formadores de precipitados como el magnesio y zirconio.

En los estudios realizados se determinó que existe una relación entre el calor de entrada (temperatura) y el tipo de compuestos intermetálicos formados, esto es debido a que al existir un aumento en la cantidad de calor de entrada y aumentar la permanencia en tiempo, se obtienen fases en forma de agujas o cuboidales, sin embargo con tiempos no mayores a 10 min, microestructuras de solución sólida α y precipitados de $Mg_2Si$ de manera distribuida, disminuyeron los micromecanismos de falla en la union de soldadura he incluso el espesor de la zona de unión disminuyó y la resistencia a la tensión resultó mayor a la del material base, esto demostró que el proceso de soldadura fuerte a base de capilaridad y difusión mejora la calidad en la unión brindando piezas soldadas libres de falta de fusión y con compuestos intermetálicos que mejoran las propiedades de la soldadura y disminuyendo los micromecanismos de falla obteniendo una unión de calidad.

El material de aporte que se utilice para la ejecución de la soldadura fuerte debe poseer una excelente capacidad de mojado de la superficie del metal base. La temperatura de fusión del material de aporte, deberá ser inferior a la del metal base donde se vaya a aplicar y que posea elementos aleantes como el silicio, magnesio y zirconio. Pero además de la apropiada temperatura de fusión en relación al metal base, el material de aporte que se utilice debe ofrecer una buena fluidez cuando esté fundido para permitir su correcta distribución por capilaridad por entre los huecos de las superficies a unir. Es debido a esto que se necesita explorar más en el campo de materiales de aporte.

# CAPÍTULO 4 Conclusiones

De acuerdo a la recopilación y análisis de la información se concluye que es factible unir materiales disímiles de aluminio teniendo en consideración el diseño de unión así como el proceso de soldadura fuerte a emplear.

En el presente invstigación se llevo a cabo una revisión de los principales parámentros de soldadura fuerte en aleaciones disímiles de aleaciones de aluminio. De acuerdo a estudios reportados en la literatura, algunos de los parámetros más significativos a tomar en cuenta es el gap y el espesor de los especimenes a unir, tiempo de permanencia y temperatura de la soldadura fuerte, así como la temperatura de fusión del material de aporte empleado y las propiedades que se obtendrán como resultado. Para la medición de estas últimas propiedades existen normas estandarizadas por la AWS las cuales permiten calcular el esfuerzo de corte en probetas sometidas a tensión y determinar los parámetros óptimos para la soldadura fuerte.

Actualmente hay estudios en la literatura de las aleaciones propuestas de manera individual en aleaciones símiles, sin embargo no se cuenta con estudios previos entre ellas, sin embargo se propone utilizar materiales de aporte con un contenido de Al-5-15%Si e.p. los cuales varían en su composición química debido a otros elementos afines y con bajo punto de fusion influyendo directamente en la fluidez, proporcionando propiedades mecánicas superiores al del metal base.Sin embargo se propone que se realicen pruebas con diferentes metales de aporte con algunos elementos aleantes los cuales podrian aumentar de manera más

significativa la resistencia a la tensión y asímismo realizar estudios térmicos a los mismos.

La soldadura fuerte al vacío de aluminio es factible debido a que incluye varios parámetros clave del proceso; niveles de profundidad de vacío, control, temperatura precisa y excelente uniformidad de temperatura los cuales son proporcionados por el programas de horno óptimos y controlados. Además de facilidad de reproducibilidad dando como resultado uniones adecuadas, con gran calidad y excelentes propiedades mecánicas. Sin embargo se debe de tomar en cuenta la limpieza y la correcta fijación de piezas de unión.

# Lista De Tablas

**Tabla 2.1** Aleaciones de aluminio comunes y sus aplicaciones [5]..... 8
**Tabla 2.2** Propiedades del aluminio [8]..... 9
**Tabla 2.3** Propiedades de aleaciones seleccionadas de aluminio a temperatura ambiente [4] ..... 13
**Tabla 2.4** Aleaciones de aluminio según AWS y efecto del elemento aleante principal. [7]..... 13
**Tabla 2.5** Denominaciones de aleaciones de aluminio forjable. [13] ..... 14
**Tabla 2.6** Denominación de aleaciones de aluminio fundido. [4] ..... 15
**Tabla 2.7** Denominaciones de Temple [17] ..... 17
**Tabla 2.8** Resumen de los tratamientos térmicos de aluminio. [16]..... 17
**Tabla 2.9** Composición química de la aleación de aluminio 6061 T6. [8] ..... 21
**Tabla 2.10** Propiedades Mecánicas de la aleación aluminio 6061 T6. [8] ..... 21
**Tabla 2.11** Composición química de la aleación de aluminio 7075 T6. [23] ..... 23
**Tabla 2.12** Propiedades mecánicas de la aleación aluminio 7075 T6. [23] ..... 24
**Tabla 2.13** Ventajas y limitaciones del proceso de soldadura fuerte. [15] ..... 26
**Tabla 2.14** Secuencia de precipitación de la aleación 601. [26, 26] ..... 35
**Tabla 2.15** secuencia de precipitación en las aleaciones aluminio-magnesio-silicio. [26] ..... 36
**Tabla 2.16** Valores de microdureza del material de base y material de unión de acuerdo con el periodo de soldadura y al espesor de la unión [27]. ..... 45
**Tabla 2.17** Composición química del cabezal, del tubo plano y del material de aporte AW-4343 7.5% Si. [21]..... 46
**Tabla 2.18** Composiciones químicas y propiedades térmicas de metales de relleno usados para unión mediante soldadura fuerte. [28] ..... 50
**Tabla 2.19** Fuerza de unión de la aleación 6061-T6 mediante soldadura fuerte con los metales de aporte Al-12Si y Al-7Si-20Cu-2Sn-1Mg. [28]..... 59

**Tabla 2.20** Resultados de la asociación europea del aluminio en un estudio para los coches producidos con aluminio en 2005. . [28]**¡Error! Marcador no definido.**
**Tabla 2.21** Aplicaciones tipicas para aplicaciones en el automóvil. . [28].... **¡Error! Marcador no definido.**
**Tabla 2.22** Evolución del contenido de aluminio en los automóviles producidos en Europa. . [28].....**¡Error! Marcador no definido.**
**Tabla 2.23** Contenido de aluminio en algunos coches producidos en Europa en el año 2005. . [28] .....**¡Error! Marcador no definido.**

# Lista de Figuras

**Figura 2.1** Representación del tratamiento de maduración (envejecimiento) artificial. [18] ..... 18
**Figura 2.2** Diagrama de fases correspondiente a la aleación Al 6061. [10] .... 20
**Figura 2.3** Uniones traslapada y a tope básicas para soldadura fuerte..... 30
**Figura 2.4** Métodos para pre-colocar alambre de aporte de soldadura fuerte. [24] ..... 31
**Figura 2.5** Colocación previa de calzas de metal de aporte para soldadura fuerte. [24] ..... 32
**Figura 2.6** Diagrama de equilibrio Al-Si [26] ..... 34
**Figura 2.7** Diagrama de equilibrio Al-$Mg_2Si$..... 35
**Figura 2.8** Secuencia de precipitación en aleaciones de aluminio-magnesio-silicio. [26] ..... 37
**Figura 2.9** Fotomicrografía de una unión de soldadura fuerte durante un periodo de 10 min y con un espesor de 0.00 mm. [27] ..... 42
**Figura 2.10** Fotomicrografías de las uniones de soldadura fuerte, periodos de duración y espesor de la unión (a) 10 min y 0.00 mm (b) 40 min y 0.00 mm (c) 10 min y 0.254 mm (d) 40 min y 0.254 mm. [27] ..... 43
**Figura 2.11** a) Probeta de tensión indicando la unión y el material base b) dibujo esquemático de los especímenes de tensión, ambas de acuerdo a la norma ASTM E8-99. [27]..... 44
**Figura 2.12** Variación del espesor de la zona de reacción debido al periodo de soldadura fuerte. [27] ..... 44
**Figura 2.13** Variación de la resistencia media a la rotura por tensión a diversos periodos de soldadura fuerte. [27]..... 45
**Figura 2.14** Ensamble del intercambiador de calor (a) Cabezal Al 3005 (b) Tubo plano 3003 (c) soldadura AW 4343. [21] ..... 47

**Figura 2.15** Aspecto general de las indicaciones relevantes (a) Unión de cabezal y tubo plano (b) discontinuidades en soldadura. [21] ..... 47
**Figura 2.16** Discontinuidades (flechas) presente en área de soldadura del cabezal y tubo plano. [21] ..... 47
**Figura 2.17** Diseño de unión (a) Cabezal, (b) Tubo Plano,(c) espaciamiento, (d) pared a 90° del cabezal. (e) soldadura. [21] ..... 48
**Figura 2.18** Microestructura de la soldadura. (a) Mapeo de la sección transversal de la soldadura, 50X. (b) Soldadura compuesta por una matriz dendrítica (c) Trazas de ínter metálicos Al-Si-Mg en forma de agujas compuesta por Al Si [21] ..... 49
**Figura 2.19** Microestructura de la soldadura. (a) Mapeo de la soldadura en la sección transversal 50X. (b) Acercamiento a las discontinuidades del tipo rechupes 200X. [21] ..... 49
**Figura 2.20** Microestructura de la aleación eutéctica de Al-12SI, en condiciones de calidad. [28] ..... 52
**Figura 2.21** Curvas DTA de la aleación Al-12Si y los metales de aporte Al-Si-Cu. [28] ..... 54
**Figura 2.22** Microestructuras de los metales de aporte de Al-Si-Cu, en condiciones de fundición: (a) Al-11.4Si-5Cu, (b) Al-10.8Si-10Cu, (c) Al-9.0Si-25Cu, y (d) Al-7.8Si-35Cu. [28] ..... 54
**Figura 2.23** Curvas 5-DTA de Al-Si-Cu-Sn (Mg) metales de relleno. [28] ..... 55
**Figura 2.24** Microestructuras de metales de aporte de Al-Si-Cu-Sn, en condición de casting: (a) Al-9Si-20Cu-5SN y (b) Al-8.4Si-20Cu-10Sn. . [28] ..... 56
**Figura 2.25** Microestructura de los metales de aporte en fundición Al-7Si-20Cu-2Sn. . [28] ..... 56
**Figura 2.26** Microestructura del material de aporte en fundición Al-7Si-20Cu-2Sn-1Mg. . [28] ..... 57
**Figura 2.27** XRD para los picos de los metales de relleno en este estudio. Al-Si-Cu-(Sn, Mg). . [28] ..... 58
**Figura 2.28** Mapeo por elemento EPMA de la junta a tope 6061-T6 soldada con Al-7SI-20Cu-2Sn-1Mg como metal de aporte a 550°C durante 30 min. . [28]... 59

**Figura 2.29** Promedio de ahorro relativo y absoluto en peso. . [28] ..... **¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 2.30** Jaguar XJ 2010 Modelo y carrocería**¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 2.31** Componentes de aluminio en los automóviles. . [28] ..... **¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 2.32** Materiales empleados en la carrocería y el chasis del Audi A6 (2010)..... **¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 2.33** Montajes del soporte de la suspensión en aluminio fundido y puente de los soportes de la suspensión en aluminio en el Audi A6**¡Error! Marcador no definido.**

***Figura 2.34*** *Materiales empleados en la carrocería y el chasis del Audi A8 (2011)* ..... **¡Error! Marcador no definido.**

# CAPÍTULO 5 Referencias


[1] **Groover**, Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas, Primera edición ed., México: Pearson Educación, (1997).

[2] **Rubinos González D**, Utilización de lodos rojos de bauxita en la contención e inactivación de residuos tóxicos y peligroso., Coruña, pp. 38-44 (1998).

[3] **Fernández-Bravo U**, Mecanizado básico : transporte y mantenimiento de vehículos, Grupo Editorial Paraninfo, p. 272 (2009).

[4] **Kalpakjian S,** Manufactura, Ingeniería y Manufactura, Quinta ed., Naucalpan de Juárez, Edo. México: Pearsion Educación de México, S.A de C.V, p. 1328 (2008).

[5] **Mott R** , Diseño de elementos de máquinas, Cuarta ed., Naucalpan de Juárez, Edo. México: Pearson Educacion de Mexico S.A. de C.V, p. 872 (2006)

[6] **Marmolejo Castro C A,** Manual de diseño de estructuras de aluminio, Distrito Federal: Tesis de Licenciatura, p. 150 (2014).

[7] **Murat Tiryakioğlu J T,** Handbook of aluminium, Physical Metallurgy and the Effect of Alloying Additions in Aluminum Alloys., New York: Mercel Dekker, p. 1310 (2003).

[8] **Butterworth-Heinemann J H,** Linacre House, Smithells Light Metals Handbook, vol. 1, Madras: Reed Educational and Professional Publishing Ltd 1998, p. 200 (2004).

[9] **Paul DeGarmo R,** Materiales y procesos de fabricación, Segunda ed., Barcelona: Reverté, S.A., p. 1300 (2001).

[10] **Davis J,** Aluminum and Aluminum Alloys (Asm Specialty Handbook) (06610G), ASM International, 1993, p. 784 (1997).

[11] **Mascareñas J I,** Estudio de una aleación de aluminio reforzado con materiales compuestos para reducción de peso en la industria automotriz, Tesis de Maestria ed., Monterrey, Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León, (2013).

[12] **King F**, El aluminio y sus aleaciones, México: LIMUSA, (2000).

[13] **Campbell F C,** Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials, Elsevier, (2006).

[14] **Puente G D,** Caracterización de precipitados en la aleación de aluminio 6061 por medio de microscopia de fuerza atómica, Monterrey, Nuevo León: UANL, p. 120 (2000)

[15] **ASM Metals Handbook** Volume 4 Heat Treating, 1991, p. p 711–725 (1991).

[16] **Romeva C I**, Selección de materiales en el diseño de máquinas, Catalunya., 2010, p. 277 (2010).

[17] **Askeland D R**, Ciencia e ingeniería de los materiales, Cuarta ed.,p. 1003 (2004).

[18] **Anzola G B**, Propiedades de los Materiales Utilizados en el Sector Aeronáutico, Colombia, 2013.

[19] **Tijo C J**, Analisis de la resistencia al impacto del aluminio 6061-T6 a una temperatura de 170°C,[En línea].Available: http://es.slideshare.net/habichuelaman/analisis-de-la resistencia-al-impacto-del-aluminio-6061-t6. [Último acceso: 18-03-2015].

[20] **Fernández R**, Estudio del efecto reforzante a alta temperatura de los elementos aleantes de la aleación 6061Al de colada mediante el método de diferencia de tensiones, Madrid, 2009.

[21] **Macias Lopez F**, Estudio del comportamiento microestructural en las uniones de soldadura fuerte en,V Congreso Cubano de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica, CCIM, 2008.

[22] **Medina L R,** Fatiga de aleaciones de aluminio aeronáutico con nuevos tipos de anodizado de bajo impacto ambiental y varios espesores de recubrimiento., Coruña: UNIVERSIDADE DA CORUÑA, 2010.

[23] **Toledano M**, Resistencia a fatiga de la aleación de aluminio 7075-t6 en función del tipo de, Research Gate, p. 7,(2015).

[24] **Brien R O**, Manual de soldadura, American Welding society, Primera ed., Pretince Hall Hispanoamericana., p. 872 (1996).

[25] **Anderson T,** Welding Aluminum - Questions and Answers - A Practical Guide for Troubleshooting Aluminum Welding, 2da ed., American Welding Society AWS, (2010).

[26] **Puig M B**, Estudio de la Conformación de Componentes Aluminio-Silicio en Estado Semisólido, Universidad politecnica de catalunya, España, (2005).

[27] **Nayeb-hashemi H,** The effect of processing variables on the microstructures and properties of aluminum brazed joints, journal of materials science, vol. 37, (2002).

[28] **Chuang T H,** development of a low-melting-point filler metal for brazing, metallurgical and materials transactions a, vol. 31a, (2009).

[29] **Craig Moller I,** Understanding Key Process Parameters of vacuum aluminum brazing,advanced materials & processes , vol. 19, p. 10, (2015).

[30] **Europe aluminum Asociation,** Aluminium in cars, EAA,( 2009).

# RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

**Nombre:** Luis Angel Aguirre Hernández

**Grado a obtener:** Especialista en la Tecnología de la Soldadura Industrial

**Títulos obtenidos:** Ingeniero en Materiales

**Universidad:** Instituto Tecnológico de Saltillo

**Campo profesional:** ingeniería de los materiales

**Experiencia profesional:** Prácticas profesionales octubre 2013

**Lugar y fecha de nacimiento:** Saltillo, Coahuila; 10 de junio de 1992

**Padres:** Sonia Teresa Hernández Arriaga y José Luis Aguirre Reyes