



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL  
**PIRHUA**

# RECONOCIMIENTO DE FASES EN ALEACIONES DE ALUMINIO EN ESTADO MODELADO

María Alejandra del Rosario Palas Zúñiga

Piura, Agosto del 2012

FACULTAD DE INGENIERÍA

Área Departamental de Ingeniería Mecánico – Eléctrica

Palas, M. (2012). *Reconocimiento de fases en aleaciones de aluminio en estado modelado*. Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia](#)  
[Creative Commons Atribución-](#)  
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

**U N I V E R S I D A D   D E   P I U R A**  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**“RECONOCIMIENTO DE FASES EN ALEACIONES DE ALUMINIO EN  
ESTADO MOLDEADO”**

Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Mecánico – Eléctrico

**María Alejandra del Rosario Palas Zúñiga**

Asesor: Dra. Ing. Rosalba Guerrero Aslla

Piura, Agosto 2012

**A Dios,  
A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional,  
A Mario por compartir conmigo todo momento y por su constante apoyo.**

## Prólogo

El aluminio puro es muy blando y tiene tendencia a la deformación mecánica y a rayarse, es por eso que, las aleaciones de aluminio presentan inconvenientes durante la preparación metalográfica, ya que la matriz de aluminio tiene que estar bien pulida para evitar errores en la interpretación de la microestructura.

Una preparación defectuosa puede arrancar todas las inclusiones importantes, destruir los bordes de grano, en resumen, originar una estructura en la superficie, que no guarda ninguna relación con la verdaderamente representativa. Está claro que el examen de tal superficie dará lugar a interpretaciones y conclusiones erróneas. Con frecuencia, las fases son difíciles de reconocer y/o distinguir entre ellas, lo que hace complicada la caracterización microestructural. Es por esta necesidad que hay en dominar las técnicas de preparación metalográfica en aleaciones de aluminio, que se plantea esta tesis.

El propósito de esta tesis es la de desarrollar una buena técnica para la preparación metalográfica convencional en el aluminio, utilizando los reactivos propuestos en la diversa literatura, tratando de encontrar el punto óptimo de ataque, para una correcta interpretación. Sistematizando el procedimiento empleado para que sirva como un manual de referencia en el laboratorio para futuros trabajos.

Quisiera agradecer a todos los que han hecho posible este trabajo, amigos que de una forma u otra ayudaron en la realización de este trabajo. A mi familia y a Mario por el soporte y aliento incondicional que siempre me han brindado. Un agradecimiento especial, a mi asesora Dra. Ing. Rosalba Guerrero Aslla por su paciencia, apoyo y amistad brindada durante la elaboración de esta tesis. Al Ing. Cesar Dioses Gutierrez por la ayuda que me ha brindado todo este tiempo. Finalmente, a la Universidad de Piura, por brindarme el material logístico necesario para poder cumplir con el objetivo propuesto.

## Resumen

El presente trabajo de investigación muestra la técnica utilizada para la preparación metalográfica en aleaciones de aluminio moldeadas, así como los reactivos y los tiempos de ataque más adecuados, para dichas aleaciones.

Las muestras utilizadas pertenecen al grupo 3xx.x (aluminio-silicio-cobre) de las aleaciones de aluminio vaciadas. Estas muestras fueron extraídas de la paleta de un ventilador (aleación 319.2) y de un pistón de un motor de combustión interna (384.2).

La primera parte de esta investigación, muestra aspectos generales del aluminio, historia, propiedades, etapas de producción, industria y reciclado. Después, se da una descripción de las aleaciones de aluminio y sus principales elementos aleantes, incluyendo la agrupación y designación de las aleaciones, luego se puntualiza en las aleaciones de aluminio vaciadas, y un repaso sobre teoría de solidificación. En el cuarto y penúltimo capítulo, se desarrollan los procedimientos a seguir para obtener una óptima preparación metalográfica, desde el esmerilado, pasando por el desbaste y pulidos intermedios, hasta el pulido final.

Como capítulo final, se presentan las micrografías obtenidas luego de los ataques químicos realizados a las muestras 319.2 y 384.2, las condiciones a las que se ha hecho cada ataque, y los tiempos aplicadas por cada ataque.

Finalmente, se hace una discusión de resultados y las conclusiones de la discusión de resultados, como son las ventajas, desventajas, y limitaciones que se tuvo al momento de realizar esta tesis.

## Índice

Prólogo .....	vii
Resumen .....	ix
Índice .....	xi
Nomenclatura.....	xv
Introducción.....	1
Capítulo 1 .....	3
1 Historia del Aluminio .....	3
1.1 Historia del descubrimiento .....	3
1.2 Propiedades .....	5
1.2.1 Propiedades físicas .....	5
1.2.2 Propiedades químicas .....	6
1.2.3 Propiedades mecánicas .....	6
1.3 Obtención del aluminio.....	7
1.3.1 Proceso de producción de aluminio primario .....	8
1.3.1.1 Extracción de bauxita .....	9
1.3.1.2 Producción de alúmina .....	10
1.3.1.3 Electrólisis de aluminio.....	11
1.3.2 Producción de aluminio primario .....	13
1.3.3 Producción de aluminio secundario.....	14
1.3.3.1 Reciclaje de aluminio .....	15
1.3.3.2 Chatarra nueva y vieja.....	16
1.3.3.3 Procesamiento de la chatarra.....	17
1.4 Industria del aluminio .....	17
1.4.1 Transporte.....	19
1.4.2 Edificación y Construcción .....	19
1.4.3 Envases .....	21
1.4.4 Energía.....	22

1.4.5	Usos Médicos. ....	23
1.5	Industria del aluminio y el reciclaje. ....	23
Capítulo 2	.....	25
2	Introducción a las aleaciones de aluminio. ....	25
2.1	Importancia de las aleaciones de aluminio. ....	25
2.2	Elementos de aleación e impurezas específicas. ....	26
2.3	Clasificación de las aleaciones de aluminio. ....	30
2.3.1	Aleaciones para forja. ....	30
2.3.1.1	Designación de aleaciones de aluminio para forja. ....	30
2.3.2	Aleaciones para moldeo. ....	31
2.3.2.1	Designación de las aleaciones vaciadas de aluminio. ....	31
2.4	Sistema de designación para tratamientos del aluminio y sus aleaciones. ....	32
Capítulo 3	.....	37
3	Aleaciones de aluminio vaciadas. ....	37
3.1	Aspectos generales. ....	37
3.2	Procesos de fundición. ....	37
3.2.1	Fundición en molde de arena. ....	38
3.2.2	Fundición con molde metálico permanente. ....	38
3.2.3	Fundición por presión o inyección. ....	38
3.3	Fundamentos de solidificación. ....	39
3.3.1	Subenfriamiento y cambio de estado. ....	40
3.3.2	Nucleación. ....	43
3.3.2.1	Nucleación homogénea. ....	43
3.3.2.2	Nucleación heterogénea. ....	44
3.3.3	Consolidación de la solidificación. ....	44
3.4	Microestructura. ....	44
3.5	Diagrama de equilibrio. ....	46
3.6	Piezas para moldeo de Aluminio. ....	47
3.7	Aleaciones vaciadas aluminio-silicio-cobre. ....	48
3.8	Microestructura en aleaciones vaciadas aluminio-silicio-cobre. ....	52
Capítulo 4	.....	55
4	Preparación Metalográfica del Aluminio: Parte Experimental. ....	55
4.1	Preparación metalográfica. ....	55
4.2	Dificultades que se presentan durante la preparación metalográfica del aluminio y sus aleaciones. ....	57
4.3	Equipos, materiales e insumos utilizados. ....	57
4.4	Seccionamiento. ....	58



4.5	Montaje .....	59
4.6	Esmerilado. ....	62
4.7	Desbaste .....	63
4.8	Pulido preliminar .....	65
4.9	Pulido Final.....	67
4.10	Ataque químico.....	70
Capítulo 5	.....	73
5	Análisis Metalográfico: Reconocimiento de fases y discusión .....	73
5.1	Identificación de fases .....	73
5.2	Análisis metalográfico .....	78
5.2.1	Estudio metalográfico de la aleación 319.2.....	78
5.2.2	Estudio Metalográfico de la aleación 384.2 .....	93
Capítulo 6	.....	105
6	Conclusiones y recomendaciones .....	105
Bibliografía	.....	109
Anexo 1: Terminología en inglés	.....	113
Anexo 2: Serie de Fuerzas Electromotrices.....		115
Anexo 3: Tablas de Composición de las aleaciones de aluminio.....		119

## Nomenclatura

IADS	: International Alloy Designation System
ANSI	: American National Standards Institute
ISO	: Organization for Standardization
UNS	: Unified Numbering system
AA	: Aluminum Association
HF	: Ácido Fluorhídrico
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	: Ácido Fosfórico
HNO <sub>3</sub>	: Ácido Nítrico

## **Introducción**

El aluminio y sus aleaciones están entre los materiales más extensamente utilizados industrialmente, debido a que sus aplicaciones están muy diversificadas.

Su baja densidad, alta resistencia mecánica y a la corrosión, una buena conductividad eléctrica y térmica, capacidad de alearse con una gran cantidad de elementos, y sobre todo, la buena relación entre resistencia mecánica y densidad, hacen del aluminio y sus aleaciones el material elegido para muchas aplicaciones, por lo que es de gran importancia hacer una buena caracterización microestructural.

Las aleaciones de aluminio pueden ser vaciadas, laminadas, extruidas, tratables o no térmicamente. Normalmente los elementos de aleación que están presente en éstas son el silicio, cromo, cobre, magnesio y zinc. Algunos elementos de aleación son utilizados en muy pequeñas cantidades, para propósitos especiales, como por ejemplo, el sodio y el estroncio que se utilizan como modificadores de la fase silicio.

A nivel mundial existen diferentes organizaciones que designan al aluminio y sus aleaciones, las más importantes están en E.U.A, Japón y Europa. En Perú se toman como referencia principalmente las normas de los E.U.A.

## Capítulo 1

### Historia del Aluminio

#### 1.1 Historia del descubrimiento<sup>1</sup>

Debe considerarse al químico inglés Sir Humphrey Davy (1807) como el primer investigador que de una forma sistemática intentó el aislamiento de este misterioso metal hasta entonces. Su trabajo estuvo basado en métodos electrolíticos y de fusión al arco eléctrico pero, su esfuerzo no lo llevó al éxito. El mismo sugirió que el metal debería llamarse “alumium”, ya que estaba indudablemente presente en la alúmina.

En 1821, el francés Pierre Berthier descubrió una roca de color rojizo, en “Les Baux” (Francia), por lo que llamó bauxita<sup>2</sup> (ver figura 1.1), al mineral más común de aluminio.

Figura 1.1: **Bauxita**



Fuente: **Página WEB [7]**

En ese mismo año, el científico danés Hans Christian Oersted obtiene por primera vez el cloruro de aluminio. En 1825, Oersted consigue al fin aislar unos pequeños granos metálicos de color y aspecto similar al estaño. En Abril de ese mismo año, Oersted presenta en la Real Academia de Ciencias danesa los granos del nuevo elemento. En 1827, el investigador alemán Friedrich Wöhler, que había conocido los trabajos de Oersted, continuó con los experimentos en su laboratorio de Berlín. Tras años de dedicación, es en 1829, que consigue aislar por primera vez partículas de aluminio puro (que en total pesaban

---

<sup>1</sup> Este apartado ha sido elaborado utilizando las referencias [1], [2], [7]

<sup>2</sup> Materia prima para la producción de aluminio, compuesta por uno o más hidróxidos de aluminio, además de silicato y hierro como principales impurezas.

la cantidad de 32 mg). En 1845, en base a estas partículas, determinó sus principales propiedades como densidad, conductividad, su notable luminosidad, resistencia a la corrosión, etc.

Partiendo de los trabajos de Wöhler, el francés, Henri Sainte-Claire Deville, presenta en febrero de 1854 ante la Academia de Ciencias francesa un sistema mejorado de obtención, que permite conseguir producción de metales de alto costo en cantidades limitadas y que significa ya un paso importante hacia el uso industrial del aluminio.

En 1855 es presentado como metal precioso, junto con las joyas de la corona de Francia, en la Exposición Universal de París. Ese mismo año, dos colaboradores de Deville instalan en “Amfreville-la-Mi-Voie” una pequeña fábrica.

Los trabajos de Saint - Claire, apoyados por el propio emperador Napoleón III, progresan hacia métodos cada vez más perfeccionados. En 1857 se constituye la primera sociedad de producción de aluminio, obteniéndose en la fábrica de “Nanterre” una producción de 40 kg diarios y en 1860 una producción de 500 kg a un precio de 100 francos el kilo.

Las primeras aplicaciones de este metal precioso se destinaron a la fabricación de artículos de lujo: una cubertería para la mesa del Emperador, un sonajero para su hijo, también se usaba para material de joyas, e incluso, el monumento a George Washington en los Estados Unidos, fue coronado con una plancha del valioso metal. El aluminio era algo exótico que llamaba la atención de la gente.

Sin embargo, a pesar de las mejoras realizadas al sistema de Sainte-Claire Deville, sólo permitía la obtención de pequeñas cantidades de aluminio a un costo muy elevado.

La verdadera revolución en el campo de la obtención de aluminio llegó en el año 1886, con la puesta en marcha del método de electrólisis de la alúmina fundida en criolita (sales de ácido fluorhídrico  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), realizado por el francés Paul Louis Toussaint Heroult y el norteamericano Martin Hall, trabajando de forma completamente independiente.

La invención del proceso ideado por Heroult y Hall, permitió un importante descenso en el precio de la extracción del aluminio a partir del mineral, abriéndole las puertas a este metal para su creciente utilización a escala industrial en las más diversas áreas tecnológicas. Los primeros vehículos con motor de combustión interna fueron apareciendo, y el aluminio podía desempeñar un papel de cada vez mayor valor como material de ingeniería en la industria automotriz. Ya en 1888 son fundadas las primeras empresas del aluminio en Francia, Suiza y los Estados Unidos

El éxito del proceso Hall / Héroult se adelantó cuando poco después Karl Bayer, un austriaco, mejoró el método preliminar de tratamiento de la bauxita con soda cáustica. Estas invenciones sellaron el destino del aluminio en 1890, el costo del aluminio había caído un 80 por ciento desde los precios de Deville.

La producción mundial alcanzó las 6.700 toneladas hacia 1900, 700.000 en 1939 y en 1943 llegó a los dos millones debido al impulso de la II Guerra Mundial.

Es a finales del siglo XIX, que el aluminio se convierte en un competidor económico gracias a sus aplicaciones en la ingeniería, y a la necesidad de nuevos desarrollos industriales<sup>3</sup>.

## 1.2 Propiedades<sup>4</sup>

El aluminio obtenido por electrólisis en baño de criolita posee normalmente una pureza entre un 99.5% y un 99.7%, siendo el hierro y el silicio las impurezas más usuales del aluminio extraído. Para la obtención del metal con pureza superior al 99.9% se somete el metal procedente del baño de criolita a procesos de refinado.

Una de las características más llamativas del aluminio es su versatilidad. La gama de propiedades físicas, químicas y mecánicas que se pueden desarrollar es notable.

### 1.2.1 Propiedades físicas<sup>5</sup>

Las propiedades físicas más destacables del aluminio puro son su elevada conductividad térmica y eléctrica, y su gran ligereza. Su densidad de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, aproximadamente un tercio de la del acero (7,83 g/cm<sup>3</sup>), permitirá la construcción de elementos estructurales más ligeros al disminuir la masa total. En la Tabla 1.1 se detallan las propiedades físicas más características del aluminio.

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

Propiedad	Característica - Valor
Color	Blanco
Estructura Cristalográfica	FCC Cúbica Centrada en la Caras
Parámetro Reticular (20 °C)	0,40414 nm
Densidad (20 °C)	2,699 g/cm <sup>3</sup>
Cambio Volumétrico durante la Solidificación	6,70%
Calor de Combustión	200 kcal/(atm g)
Punto de Fusión	660,2 °C
Punto de Ebullición	2057 ÷ 2480 °C
Calor Específico	930 J
Coefficiente Lineal de Expansión Térmico (10 <sup>6</sup> )	23 °C (20 ÷ 100 °C)
Conductividad Eléctrica (Valor máx.)	34 ÷ 38 m/(Ω mm <sup>2</sup> )
Conductividad Térmica	80 ÷ 230 W/(m · K)
Resistividad Eléctrica	2,69 μΩ · cm
Susceptibilidad Magnética (18 °C)	0,63

Fuente: **Ardila López [3]**

<sup>3</sup> Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Mecánico. Universidad Tecnológica de Pereira. [14]

<sup>4</sup> Este apartado ha sido elaborado utilizando las referencias [3] y [4].

<sup>5</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando la referencia [3] y [6].

El aluminio no es ferromagnético ni diamagnético, no se oxida y tiene larga duración, una característica de importancia en la industria eléctrica y electrónica. Es seleccionado a menudo por su conductividad eléctrica, que es casi el doble de la del cobre sobre una base equivalente de peso. La conductividad térmica de las aleaciones de aluminio es alrededor de 50 a 60% la del cobre, es ventajoso en intercambiadores de calor, evaporadores, aparatos de calentamiento eléctrico, y de automoción, culatas y radiadores.

### 1.2.2 Propiedades químicas<sup>6</sup>

El aluminio, como se indica en la serie de fuerzas electromotrices<sup>7</sup>, es un metal químicamente activo, esto quiere decir que se oxida rápido debido a la afinidad del oxígeno con el aluminio. Una vez formada la capa de óxido en la superficie, ésta actúa como un escudo, ya que es muy dura y compacta, evitando de esta forma la progresión de la oxidación hacia el interior. Tal es la capacidad de protección de esta capa de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), que se han desarrollado sistemas de protección -anodizados- basados en una oxidación controlada de piezas de aluminio con objeto de obtener mayores espesores de óxido y más compactos, para aumentar su resistencia a la intemperie.

Los ácidos clorhídricos, fluorhídricos y sulfúricos concentrados pueden atacar fácilmente al aluminio y a sus aleaciones, mientras que las soluciones de ácido nítrico, amoníaco y la mayoría de ácidos orgánicos, los atacan ligeramente. La resistencia química del aluminio depende de la composición química y concentración de la solución, así como de la pureza del metal. Por ejemplo, en ácido nítrico el aluminio de pureza 99,99% es mucho más resistente al ataque que el aluminio de pureza 99,5%.

Según el efecto que tienen los elementos aleantes sobre la resistencia a la corrosión, éstos se pueden clasificar en:

- Elementos que mejoran la resistencia a la corrosión: Cr, Mg y Mn.
- Elementos que empeoran la resistencia a la corrosión: Cu, Ni, Sn, Pb y Co.
- Elementos que tienen poca influencia: Si, Ti, Zn, Cd y Zr.

El aluminio, es no pirofórico<sup>8</sup>, lo cual es importante en aplicaciones que involucran manipulación de materiales inflamables o explosivos.

### 1.2.3 Propiedades mecánicas<sup>9</sup>

El principal problema del aluminio puro, es su baja resistencia mecánica. Sin embargo, ésta puede mejorarse con elementos de aleación. Una vez obtenida la aleación de aluminio, puede seguirse endureciendo mediante tratamientos térmicos y/o someterse al proceso de

---

<sup>6</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando la referencia [3], [5] y [29].

<sup>7</sup> Ver Anexo 2.

<sup>8</sup> Que no se inflama espontáneamente en contacto con el aire o con la humedad de éste.

<sup>9</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando la referencia [3].

forja. Por otro lado, Cabe destacar también que el módulo de elasticidad del aluminio puro es, también, relativamente bajo y muy sensible al porcentaje de impurezas.

A continuación, se muestran en la Tabla 1.2, las propiedades estructurales más características del aluminio.

Tabla 1.2. **Relación de propiedades mecánicas más relevantes del aluminio.**

Propiedad	Característica – Valor
Módulo de Elasticidad (Grado de Pureza 99.99%)	64.200 N/mm <sup>2</sup>
Módulo de Elasticidad (Grado de Pureza 99.95%)	69.000 N/mm <sup>2</sup>
Módulo de Rigidez	17.000 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.32 ÷ 0.36

Fuente: **Ardila López [3]**

La selección de las aleaciones deberá tomar un compromiso entre la maximización de las propiedades mecánicas y las propiedades de conformado de éstas, para la fabricación de las estructuras de aluminio.

### 1.3 Obtención del aluminio<sup>10</sup>

La metalurgia del aluminio y su proceso de obtención están muy condicionados por su especial carácter electroquímico el cual se manifiesta en la gran afinidad del elemento por los no metales, como el oxígeno y el cloro, determinada su posición electronegativa en las series de potenciales electroquímicos<sup>11</sup>. Es por este motivo que no es posible, en un principio, aplicar al aluminio los mismos procesos carbotérmicos, a partir de sus óxidos, que se emplean con metales como el cobre, el estaño, el hierro, el plomo y el zinc; principalmente por las altas temperaturas requeridas (sobre los 2000 °C).

El aluminio es uno de los metales más frecuentes en la corteza terrestre. Su proporción es más o menos el 8.13% que supera a la del hierro que es 5%, cobre y otros muchos metales utilizados en la técnica humana.

Debido a su afinidad por el oxígeno nunca se encuentra en forma libre en la naturaleza, es decir, no se encuentra en su estado puro, sino combinado en forma de compuestos químicos o minerales, de los cuales las más importantes son las bauxitas, que están formadas por un 62-65% de alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), hasta un 28% de óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 12-30% de agua de hidratación (H<sub>2</sub>O) y hasta un 8% de sílice (SiO<sub>2</sub>), ésta es la razón de su tardío aislamiento, la que obliga a utilizar métodos de reducción. El proceso de producción es complejo y consume mucha energía.

<sup>10</sup> Este apartado ha sido elaborado utilizando las referencias [1] y [14].

<sup>11</sup> Electronegatividades: Al = 1.5, O =3.5, Cl =3.0

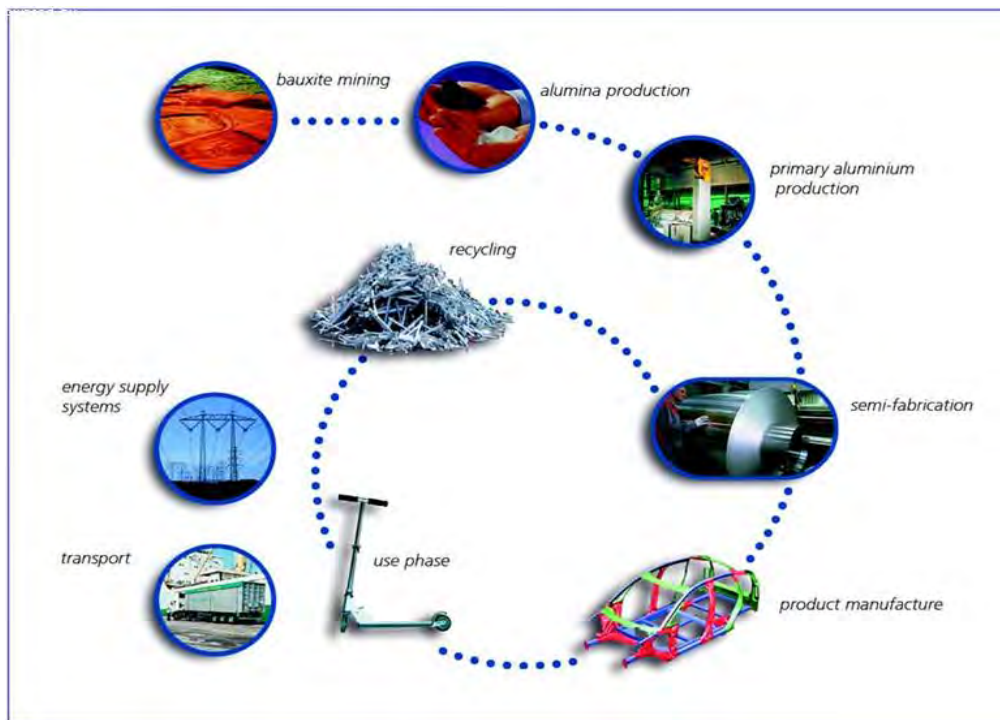


Dependiendo del origen del aluminio, las aleaciones pueden ser primarias o secundarias. Se clasifica a una aleación como primaria, a aquella aleación que utiliza material virgen, mientras que toda aleación que utiliza materiales reciclados, se considera como secundaria.

Actualmente más del 80% de aluminio procesado para aplicaciones automotrices es utilizado de aleaciones secundarias. Como todo material reciclado, una aleación secundaria tendrá impurezas difíciles de controlar que alterarán las propiedades mecánicas de la pieza.

En la figura 1.2, se muestran las distintas fases del ciclo de vida del aluminio, para saber cómo el aluminio, el material y la industria, contribuyen a la sostenibilidad en todas las etapas.

Figura 1.2. Fases del ciclo de vida del aluminio



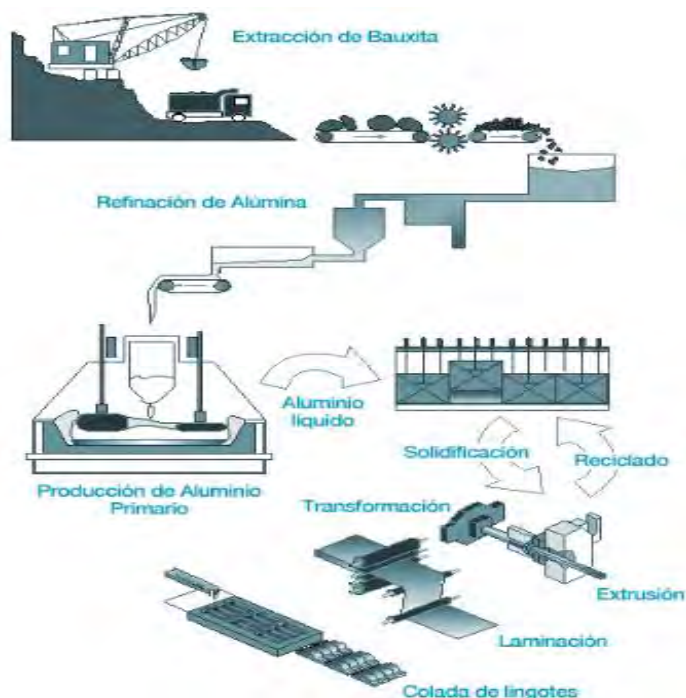
Fuente: **European Aluminium Association [9]**

### 1.3.1 Proceso de producción de aluminio primario<sup>12</sup>

Cabe destacar el proceso de obtención del aluminio primario, pues el metal resultante es la base de todas las aleaciones de aluminio, y sus propiedades se ven afectadas en mayor o menor grado dependiendo de la presencia de impurezas. La producción de aluminio consiste de tres pasos: extracción de bauxita, producción de alúmina y electrólisis de aluminio.

<sup>12</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando la referencia [14].

Figura 1.3. **Proceso de producción de aluminio primario.**



Fuente: Trabajo de Grado. Arciniegas [14]

### 1.3.1.1 Extracción de bauxita<sup>13</sup>

Más de 160 millones de toneladas de bauxita se extraen cada año. Los lugares principales de depósitos se encuentran en zonas tropicales y sub-tropicales. La Bauxita actualmente se extrae en Australia, América Central y América del Sur (Jamaica, Brasil, Surinam, Venezuela, Guyana), África (Guinea), Asia (India, China), Rusia y hay también algunas minas de bauxita en Europa (Grecia).

La bauxita se refina para obtener óxido de aluminio (alúmina) y luego a través de un proceso electrolítico se reduce a aluminio metálico.

La bauxita es extraída principalmente por el método de minería a cielo abierto, aproximadamente a unos 4 a 6 metros de profundidad, los cuales tienen un impacto en el ambiente. Los principales aspectos ecológicos a considerar están relacionados con la limpieza del suelo, impacto en la flora y fauna local y la erosión del suelo.

La industria está comprometida con la reforestación de los sitios de extracción. El 80% de todas las áreas forestales explotadas para fines de extracción de bauxita son reforestadas y el 20% restante es convertido en tierra agrícola en beneficio de las comunidades locales.

<sup>13</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [9], [15], [16] y [21].

### 1.3.1.2 Producción de alúmina<sup>14</sup>

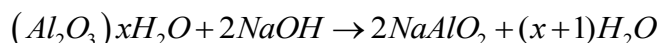
Esto es realizado a través del uso del proceso químico Bayer en las refinerías de alúmina. El óxido de aluminio es separado de las otras sustancias de la bauxita mediante solución de soda cáustica (hidróxido de sodio) a alta presión y temperatura. La mezcla obtenida, contiene una solución de aluminato de sodio y partículas insolubles de bauxita (como son hierro, silicio y titanio), es filtrada para remover todas las partículas, estos residuos caen al fondo del tanque y se retiran. Se les conoce coloquialmente como barro rojo.

La solución de aluminato de sodio claro es bombeada a un enorme tanque llamado precipitador, y luego pasan a través de un horno de calcinación rotatorio a 1100°C para expulsar el agua contaminada químicamente. Después de la calcinación, el producto final (alúmina pura), es un fino polvo blanco.

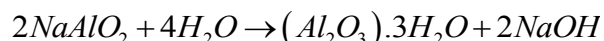
El proceso para obtener alúmina pura a partir de la bauxita ha cambiado muy poco desde finales del siglo XIX. El proceso Bayer puede ser considerado en tres etapas:

La bauxita tiene que ser convertida en óxido de aluminio puro (alúmina) antes de que pueda ser transformada en aluminio por medio de la electrólisis.

1. Extracción: las condiciones dentro del digestor (concentración, temperatura o presión) varían según las propiedades de la bauxita utilizada. Las plantas modernas operan entre unos 200 a 240°C y pueden implicar presiones de aproximadamente 30 atm.



2. Precipitación: los cristales de hidrato son clasificados en fracciones por tamaño e introducidos dentro de un horno rotativo o un lecho fluidificado para su calcinación.



3. Calcinación:  $Al(OH) \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2O$

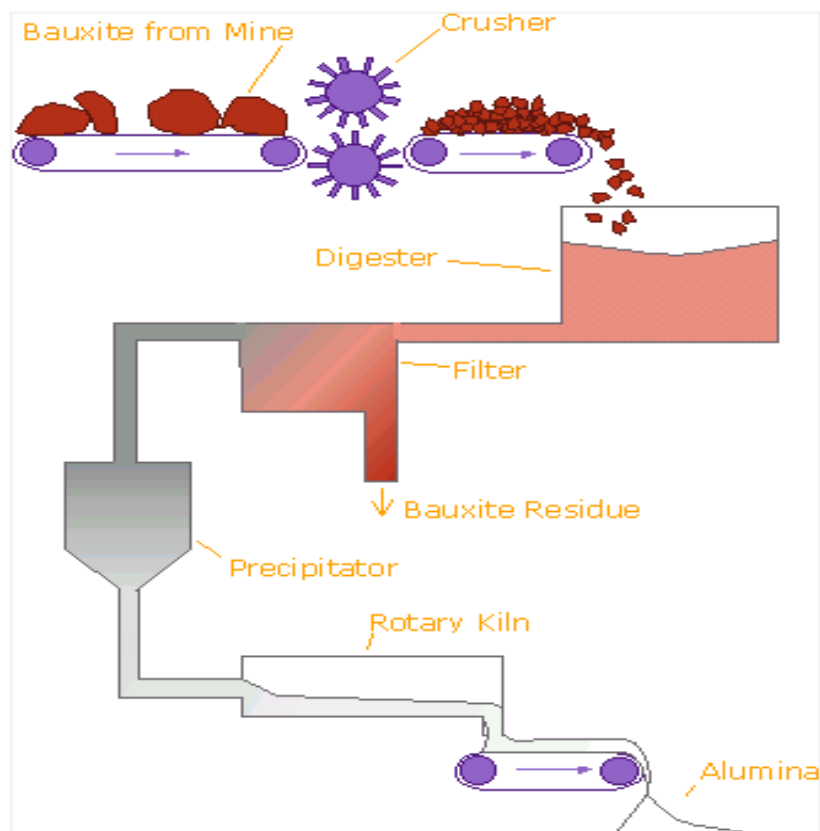
En el mundo, el rango promedio es de 4 a 5 toneladas de bauxita necesarios para producir 2 toneladas de alúmina, las cuales producirán 1 tonelada de aluminio en la fundición primaria. En el 2010, 87.4 mil toneladas de alúmina se produjeron en todo el mundo.

Para incrementar la producción de aluminio se necesita una bauxita con la más baja cantidad sílice, debido a que ésta reacciona produciendo aluminio silicato de sodio, el cual es insoluble y produce una pérdida de alúmina.

---

<sup>14</sup> Este apartado ha sido elaborado utilizando las referencias [8], [15], [16] y [21].

Figura 1.4. **Proceso de producción de alúmina.**



Fuente: **International Aluminium Institute [8]**

Las refinерías de alúmina se localizan usualmente cerca de las minas de bauxita, por razones de logística.

### 1.3.1.3 Electrólisis de aluminio<sup>15</sup>

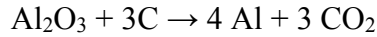
El aluminio primario se produce en plantas de reducción, donde el aluminio metálico es extraído de la alúmina por medio del proceso Hall-Hérault, inventado en 1886.

Para la producción electrolítica del aluminio se opera sobre una solución particular, obtenida disolviendo alúmina en criolita fundida ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) y se electroliza en una celda electrolítica usando ánodos (electrodo positivo) y cátodos (electrodo negativo) de carbono. Se realiza de esta manera, ya que la alúmina proveniente del proceso Bayer tiene un punto de fusión extremadamente alto (por encima de los  $2000^\circ\text{C}$ ), muy caro y difícil de alcanzar en la práctica industrial. La mezcla con la criolita da una mezcla eutéctica, que logra reducir el punto de fusión, a temperaturas del orden de  $950^\circ\text{C}$  a  $1000^\circ\text{C}$ . Esta mezcla de

<sup>15</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [15], [18], [21] y [25].

masa fundida se electroliza a baja tensión de 4.5 Voltios, pero con una elevada corriente de 50KA – 350KA.

Durante la electrólisis el carbono del ánodo reacciona con el oxígeno de la alúmina y, en una reacción secundaria, se produce aluminio metálico con la formación de dióxido de carbono:

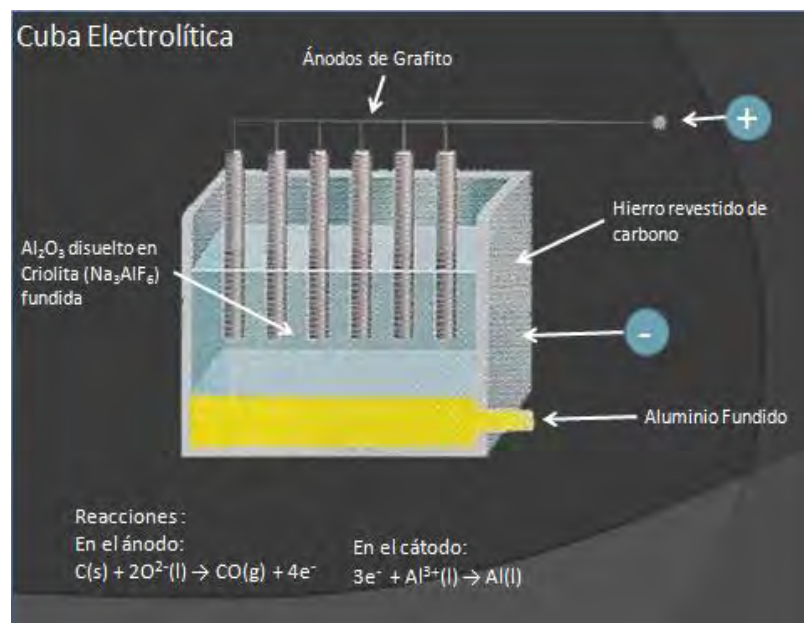


A intervalos regulares, el aluminio fundido o metal líquido, es retirado de las celdas electrolíticas y llevado a un horno donde se mezcla de manera precisa con otros metales para formar diversas aleaciones, y ser sometido a diferentes pruebas de calidad, limpieza de óxidos y gases, mediante adición de fundentes. Después se vierte en moldes o se funde directamente en lingotes. Estos pueden adoptar la forma de tochos de extrusión, para los productos extruidos, o laminado de lingotes, para los productos laminados, dependiendo de la forma en que se quiera procesar. El aluminio fundido tiene una densidad mayor que el electrolito de fusión y se asienta en el fondo de la cuba o celda electrolítica.

Por esta razón el consumo energético que se utiliza para obtener aluminio es muy elevado y lo convierte en uno de los metales más caros de obtener, ya que es necesario gastar entre 16 y 20 Kwh por cada kilo de metal de aluminio.

De estos baños se obtiene aluminio metálico en estado líquido con una pureza entre 99.5 y un 99.9%, quedando trazas de hierro y silicio como impurezas principales.

Figura 1.5. **Electrólisis de Aluminio.**

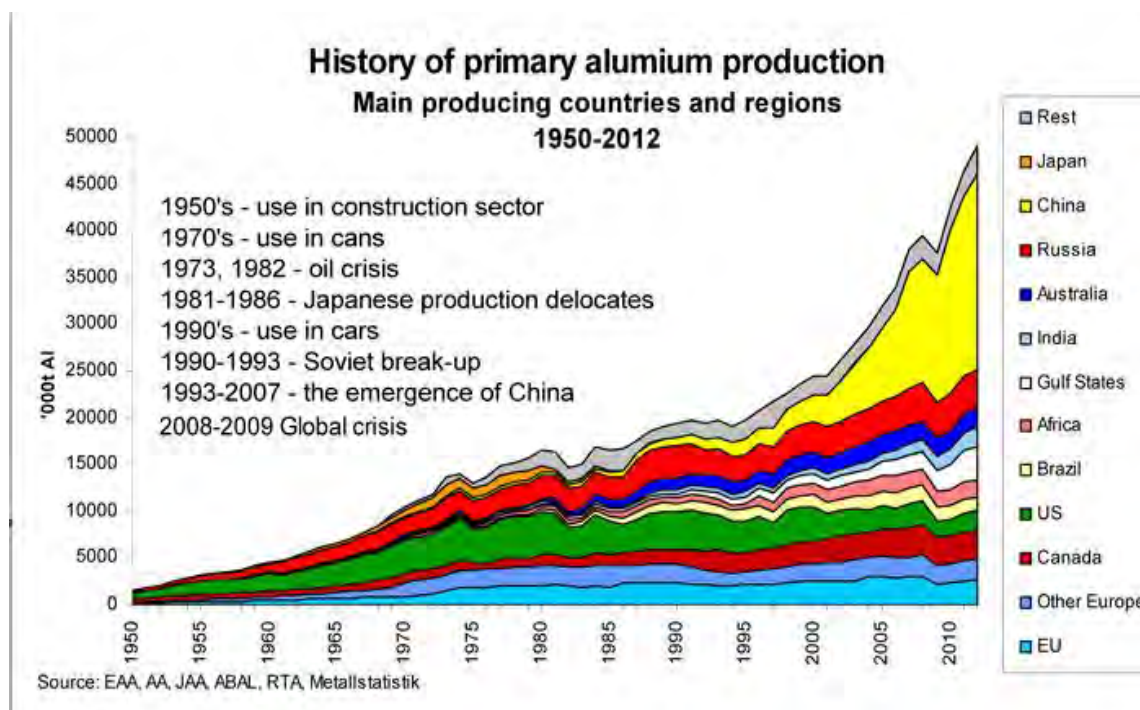


Fuente: **Aluminio [25]**

### 1.3.2 Producción de aluminio primario<sup>16</sup>

Las tendencias mundiales en la producción se muestran en la figura 1.6. La producción de aluminio se ha incrementado por un factor de 13 desde 1950, haciendo del aluminio el más ampliamente utilizado de los metales no ferrosos. En 2010, la producción mundial de aluminio primario fue de 42,6 millones de toneladas por año.

**Figura 1.6.** Producción de aluminio primario.



**Fuente:** European Aluminium Association

Muy recientemente, China desarrolló su producción de aluminio muy rápidamente, y es el mayor productor del mundo con más de 17 millones de toneladas de producción.

Las otras áreas principales de producción en Norteamérica, Europa (4,2 millones de toneladas), de la CEI, África, Australia, Brasil, India y Oriente Medio. En Europa, los principales países productores son Alemania, Francia, España, Noruega e Islandia. En todo el mundo, las plantas de producción están situados principalmente en los recursos adecuados de energía eléctrica están disponibles.

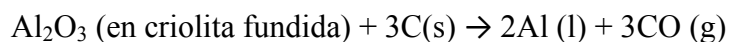
En el Perú, en el sector siderometalúrgico, en el periodo de enero a septiembre del 2011, las exportaciones de barras de aluminio fueron de US\$ 0.16 millones que representa el 0.02% de las exportaciones en este sector.

<sup>16</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando la referencia [9], [28].

### 1.3.3 Producción de aluminio secundario<sup>17</sup>

La fuente de producción secundaria de aluminio es la chatarra en todas sus formas. Casi la totalidad de los productos de aluminio pueden desde un punto de vista técnico (factibilidad) y económico (rentabilidad) ser reciclados repetidamente para producir nuevos productos, sin perder el metal su calidad y propiedades. La utilización de metales reciclados ahorra energía y preserva las fuentes de recursos naturales. El Aluminio hace una contribución importante y única para apoyar el reciclaje de productos en el futuro y en beneficio de la sociedad en su conjunto.

Es importante comparar la energía consumida en la producción de aluminio a partir de la bauxita con la que se requiere en el reciclaje del aluminio. La reacción global para el proceso Hall se puede representar por:



Para lo cual la variación de  $\Delta H^\circ = 1340\text{kJ}$  y  $\Delta S^\circ = 586\text{ J/K}$ . a  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ , que es la temperatura del proceso, el cambio estándar de energía libre está dado por:

$$\begin{aligned}\Delta G^\circ &= \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \\ \Delta G^\circ &= 1340\text{kJ} - (1273\text{K}) \cdot (586\text{J/K}) \cdot (1\text{kJ}/1000\text{J}) \\ \Delta G^\circ &= 594\text{kJ}\end{aligned}$$

Tomando en cuenta este resultado y la ecuación química del proceso, se observa que la cantidad de energía requerida para producir un mol de aluminio a partir de la bauxita por electrólisis es  $Q_e = 297\text{kJ}$ .

Cuando el aluminio metálico se recicla, la única energía requerida es el calor necesario para llevar la lata a su punto de fusión ( $660\text{ }^\circ\text{C}$ ) más el calor de fusión ( $10,7\text{kJ/mol}$ ). La cantidad de calor necesaria para calentar un mol de metal de  $25\text{ }^\circ\text{C}$  a  $660\text{ }^\circ\text{C}$  es:

$$\begin{aligned}Q &= M \cdot c_e \cdot \Delta T \\ Q &= (27\text{g}) \cdot (0,9\text{J/g}\cdot^\circ\text{C}) \cdot (660 - 25)^\circ\text{C} \\ Q &= 15,4\text{kJ}.\end{aligned}$$

Por lo tanto, la energía necesaria para reciclar un mol de Al está dada por:

$$\begin{aligned}Q_i &= 15,4\text{kJ} + 10,7\text{kJ} \\ Q_i &= 26,1\text{kJ}\end{aligned}$$

Para comparar los requerimientos energéticos de los dos métodos se encuentra la relación:

$$\begin{aligned}R &= (Q_i / Q_e) \times 100 \\ R &= [(26,1\text{kJ}) / (297\text{kJ})] \times 100 \\ R &= 8,8\%\end{aligned}$$

<sup>17</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [15], [19] y [24].

Así, al reciclar las latas de aluminio se puede ahorrar aproximadamente 91,2% de la energía requerida para obtener el metal a partir de la bauxita. Y al reducir la necesidad de extraer bauxita, el reciclaje de chatarra contribuye a evitar los residuos mineros tóxicos. El reciclaje es una parte esencial de la industria del aluminio y tiene interés económico, técnico y ecológico.

Es por eso que el creciente uso del aluminio reciclado en diversas aplicaciones le da el reconocimiento de metal verde.

El aluminio secundario se produce de muchas formas y se emplea en un 80% para aleaciones de moldeo. Otra aplicación importante es para la extrusión. Y también tienen las certificaciones ISO 9000 e ISO 14000.

### 1.3.3.1 Reciclaje de aluminio<sup>18</sup>

El reciclaje de un material es la única alternativa que existe para dañar lo menos posible el medio ambiente y no vernos rodeados de chatarra y residuos. Es el proceso mediante el cual un recurso valioso se vuelve a su estado original con sus propiedades completas, para su reutilización infinita sin pérdida de calidad.

El aluminio es 100% reciclable una y otra vez, y su recuperación por medio del reciclaje se ha convertido en una faceta importante de la industria del aluminio.

El reciclaje de aluminio produce beneficios ya que proporciona fuente de ingresos y ocupación para la mano de obra no calificada.

Figura 1.7. **Reciclaje de aluminio.**



Fuente: **European Aluminium Association [9]**

---

<sup>18</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [9], [15], [20], [23], [43], [44].



El reciclaje del aluminio en Norte América y Europa es una actividad económica bien desarrollada; que cobró impulso después de la Segunda Guerra Mundial, tras el rápido crecimiento económico e industrial, y especialmente después de la introducción de envases de aluminio para la bebida, que fue de fácil apertura. Aunque al día de hoy los mercados de los metales también incluyen el reciclaje de metales ferrosos como el hierro y el acero, y metales no ferrosos como el cobre y el latón, el reciclaje de aluminio es el motor de la economía del reciclaje.

En la actualidad, alrededor de 700 millones de toneladas de aluminio están todavía en uso, que equivalen a más del 70% de todo el aluminio fabricado desde 1888. Esto es posible gracias al largo ciclo de vida del aluminio (de 10 a 20 años de durabilidad en el aluminio utilizado en los medios de transporte, y de 50 a 80 años en los materiales de construcción). Como se puede reciclar indefinidamente, el aluminio tiene tasas de reciclado muy altas, ya que por ejemplo se recicla más del 90% en el aluminio utilizado en medios de transporte y materiales de construcción, más del 55% en envases, y algunos países alcanzan hasta el 90% de tasa de reciclaje para las latas de bebida.

En Europa, el 2010, la producción de reciclaje fue de 5.2 millones de toneladas de aluminio reciclado. Alrededor del 40% de la demanda Europea de Aluminio está satisfecha por el material reciclado. Una gran mayoría de aluminio reciclado es utilizado por el sector de la automoción. Los principales mercado son de ingeniería, embalaje y construcción.

En el Perú, los residuos de aluminio se venden a las empresas fundidoras nacionales y otra significativa parte se exporta. Las exportaciones de residuos de aluminio al mercado exterior están por encima de las 2000 toneladas anuales<sup>19</sup>. Y el principal país de destino de estas exportaciones es China con el 31%, seguido de Ecuador con 26%<sup>20</sup>.

La fuente más común de desechos de aluminio son productos de aluminio, perfiles, envases.

### **1.3.3.2 Chatarra nueva y vieja<sup>21</sup>**

El aluminio destinado al reciclaje se puede describir en dos categorías: desechos nuevos y desechos viejos. La chatarra nueva es el material excedente que se desecha durante la fabricación de aleaciones de aluminio. La mayoría de chatarra nueva que llega a la industria del reciclaje proviene directamente de la industria manufacturera. Por lo general, de buena calidad y composición, y a menudo sin recubrimiento. El 100% de la fabricación de derivados y desechos de fabricación, se refunde en la industria del aluminio.

Los desechos viejos son los materiales de aluminio que se recogen después de que un producto de aluminio ha llegado al final de su vida útil.

---

<sup>19</sup> Informe Anual de Residuos Sólidos Municipales y No Municipales en el Perú, Gestión 2009. [43].

<sup>20</sup> Sección Comercio exterior – Informativo Vera Paredes. [44].

<sup>21</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando la referencia [9].

La chatarra vieja llega a los recicladores a través de una red muy eficiente de comerciantes de metales, coleccionistas, desmontadores y procesadores de chatarra, que tienen la tecnología para separar el aluminio, por ejemplo, desde los motores de los vehículos, aparatos electrodomésticos, etc. Esto suele hacer uso de equipos pesados como trituradoras, normalmente junto con separadores magnéticos para eliminar el hierro, y centrifugas para quitar el aceite y el agua que puedan estar presentes.

### **1.3.3.3 Procesamiento de la chatarra<sup>22</sup>**

La chatarra debe ser de calidad adecuada antes de ser fundida. Para obtener este nivel de calidad, todo el material adherente debe ser removido, y la chatarra, debe ser ordenada según el tipo de aleación y el contenido de aluminio.

Como el último eslabón de la cadena de reciclado, las refinerías y refundidores contribuyen de manera significativa a la protección de nuestro medio ambiente. Son ellos los que garantizan la producción de un material que puede ser reabsorbida en el ciclo de vida de aluminio.

Las fundidoras producen una gran variedad de piezas de fundición que se utilizan principalmente en el sector del transporte. Más del 70% de las piezas moldeadas se utilizan en los automóviles. Ejemplos de piezas moldeadas producidas a partir de aleaciones recicladas incluyen pistones de motores, bloques de motor, engranajes y equipos auxiliares.

Se pueden encontrar productos de aleaciones forjadas, tales como, láminas, papel de aluminio y perfiles de extrusión, envases de alimentos, envases farmacéuticos, envases de bebidas, ventanas, puertas, remolques de camiones.

La eficiencia del reciclaje de aluminio se traduce en altos índices de reciclado para las diferentes aplicaciones.

## **1.4 Industria del aluminio<sup>23</sup>**

El aluminio es un componente clave en tantos aspectos de nuestra vida; ya sea para hacer un coche o un avión más ligero, para ser más favorable y más seguro al medio ambiente, para construir estructuras más duraderas que requieran menos mantenimiento, para preservar los alimentos y las bebidas frescas durante más tiempo, minimizar el peso del embalaje, y para ofrecer una mayor eficiencia de energía.

Mirando hacia atrás con la perspectiva de un par de siglos, resulta realmente admirable constatar el avance de la tecnología del aluminio, que ha supuesto pasar por muchos campos tecnológicos, desde los primeros pasos de su historia a la aplicación actual de sofisticadas aleaciones en las más variadas áreas.

---

<sup>22</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando la referencia [9].

<sup>23</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [8] y [20].

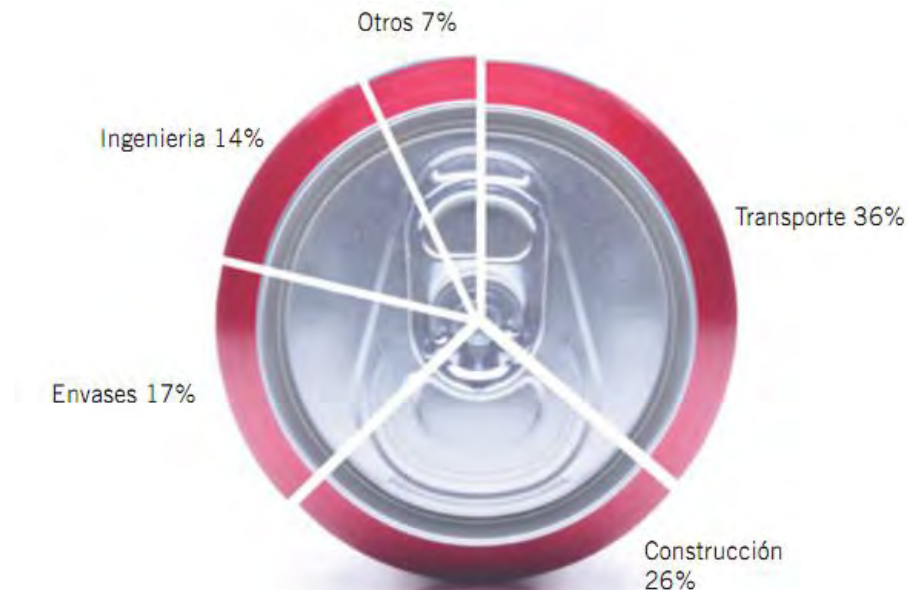
El aluminio es un material joven, y en poco más de un siglo<sup>24</sup> desde su primera producción comercial, se ha convertido en el segundo metal más utilizado después del acero. El aluminio es el metal de elección para los principales diseñadores, arquitectos e ingenieros, todos ellos en busca de un material que combina la funcionalidad y la rentabilidad con visión de futuro, es por esto que la demanda de productos de aluminio aumenta año tras año.

Su combinación única de propiedades (ligero, resistente, flexible y reciclable), las numerosas formas que puede adquirir (fundición, extrusión y tubos, láminas y placas, hojas, polvos, piezas forjadas, etc.) y la variedad de acabados superficiales que permite (revestimientos, anodizado, pulido, etc.), lo hacen ideal para una amplia gama de aplicaciones y parte esencial de la vida moderna.

Algunos ejemplos de áreas donde el aluminio ayuda a las personas y a la economía para operar con eficacia y eficiencia son: el aire, carretera, ferrocarril y transporte marítimo, la comida y la medicina, embalaje, construcción, electrónica y transmisión de electricidad.

El mercado para este tipo de productos se distribuyó en 2011 tal y como se muestra en la siguiente gráfica:

Figura 1.8. Usos de aluminio reciclado.



Fuente: **Página WEB [20]**

<sup>24</sup> Hace 153 años se produjo comercialmente.

### 1.4.1 Transporte<sup>25</sup>

Durante la última década, la utilización de aluminio en la industria del transporte, (camiones, aviones, automóviles, etc.) ha aumentado de forma constante y está dedicando importantes recursos para aumentar su participación en este sector. Aproximadamente, un 8% del peso del automóvil es de aluminio. Este interés responde a criterios ecológicos, además de económicos. Actualmente, se fabrican en aluminio piezas fundidas (pistones, ruedas, cajas de transmisión, conjuntos de suspensión, radiadores, estructuras y carrocerías). Ya existen algunos coches, no sólo deportivos, sino autos de 4 puertas de alta gama (Audi A8) y utilitarios (Audi A4) fabricados con carrocerías de aluminio. La utilización de este material en la fabricación de vehículos conlleva grandes ventajas medioambientales: la ligereza del material supone una reducción del peso del vehículo de hasta un 30%, lo que se traduce en un ahorro de combustible, con el consiguiente ahorro de energía y, por lo tanto genera menos contaminación.

En términos de reciclabilidad, en América del Norte y Europa más del 98% del aluminio contenido en los automóviles es recuperado y reciclado. De todo el aluminio recuperado, el 75% vuelve al sector del automóvil. Asimismo, el sector ferroviario también utiliza el aluminio en sus locomotoras y vagones. Como ejemplo: un tren de aluminio aporta un ahorro de energía del 87% a lo largo de los 40 años de vida media, en comparación con otros trenes fabricados con elementos más pesados.

En el sector aeroespacial, el aluminio es indispensable gracias a su ligereza. Desde que se fabricara el primer aeroplano, el aluminio ha formado parte importante en su construcción y ha remplazado a materiales que se utilizaban en sus inicios como la madera y el acero. De hecho, el primer avión de aluminio se fabricó en la década de 1920 y desde entonces sigue vinculado a este sector gracias a la combinación de su resistencia, ligereza y maleabilidad.

### 1.4.2 Edificación y Construcción<sup>26</sup>

La industria de la construcción actualmente se enfrenta a muchos retos ambientales; desde su impacto sobre el cambio climático a, la elección de los materiales y los métodos de eliminación de residuos. Debido, a la creciente comprensión de que se tiene que considerar el ciclo de vida completo de un edificio y sus accesorios, con las realidades de diseño, funcionalidad y economía, se ha visto rápidamente al aluminio convertido en el material de elección.

El aluminio permite un alto grado de prefabricación con una variedad de acabados antes de salir de la fábrica de componentes, lo que reduce la carga de trabajo en el sitio de construcción.

Los arquitectos y diseñadores son conscientes de las cualidades únicas del aluminio, las construcciones de aluminio tienen un ciclo de vida muy largo de unos 30 a 50 años.

---

<sup>25</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando la referencia [20].

<sup>26</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [8] y [20].

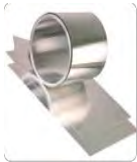

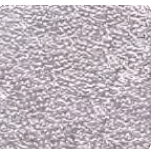
Además, de ser uno de los metales más abundantes en el mundo, es fácil de formar y afilarse, su alta relación resistencia-peso, resistencia a la corrosión y la facilidad de reciclado lo hacen ideal para: ventanas, tragaluces, pantallas, puertas, fachadas, revestimientos, impermeabilización techos, marquesinas, manijas de puertas, unidades de duchas y escaleras, marcos de soporte para paneles solares, colectores solares, escaparate acristalado y superestructuras.

En España y otros países mediterráneos, en el sector de la construcción, el uso del aluminio es mayoritario en comparación con otros metales. La demanda ha crecido de manera considerable a lo largo de los últimos 50 años y actualmente es utilizado en estructuras de ventanas y puertas y en otras estructuras como cubiertas para grandes superficies y estadios como el de Francia en París y el nuevo parlamento europeo en Bruselas. Por otra parte, cada vez más, diseñadores, arquitectos y artistas utilizan el aluminio con fines ornamentales y decorativos como por ejemplo Dumia, una cúpula realizada enteramente de aluminio y que mide más de cinco metros de altura y 12 de diámetro, situada en la plaza Real de Torino, o la Torre de Comunicaciones de Shanghái.

En el Perú, a nivel nacional se distribuyen y comercializan una gran variedad de productos de aluminio. Entre los principales están: perfiles de aluminio de diversas formas y colores, planchas de aluminio y coberturas de aluminio para revestimientos de techos y paredes de almacenes y hangares, como aislamiento y protección de los tanques de almacenamiento de combustible.

En la tabla 1.3, se muestran los principales tipos de planchas que se producen y comercializan en el Perú.

Tabla 1.3. **Tipos de planchas de aluminio producidas en Perú.**

TIPO	PRODUCTO	APLICACIONES
Planchas de Aluminio Liso		Ideal para recubrimientos y enchapes industriales, bandejas, aislamientos, señalizaciones, electrodomésticos, etc.
Planchas de Aluminio Estriado		Enchapes, escaleras, pisos, rampas, decoración, buses, furgones, etc.
Planchas de Aluminio Gofrado		Refrigeración, luminarias, transporte, enchapes, etc.

Fuente: **Corporación Miyasato.**

Las empresas más reconocidas en este rubro son Corporación Miyasato y la Corporación Furukawa, ésta última cuenta con la única planta de extrusión en el país, produce toda una variedad de perfiles de aluminio, bajo la marca Aluminios PFK para los diferentes rubros del sector industrial, como por ejemplo, construcción, iluminación, línea blanca, irrigación, decoración, señalización, entre otros.<sup>27</sup>

### 1.4.3 Envases<sup>28</sup>

El aluminio cumple todas las exigencias del envase moderno, por lo que su utilización en este sector es cada vez más importante. Las aplicaciones son múltiples y abarcan desde la fabricación de latas, el papel de aluminio de cocina, la capa intermedia de envases de cartón (tetra pack), láminas para cerrar yogures, blísteres de medicamentos, aerosoles, bandejas de comida precocinada y platos de comida para mascotas, entre otros. Los envases de aluminio se han convertido en parte de la vida cotidiana.

Los envases de aluminio ofrecen un alto nivel de resistencia a la corrosión, que proporciona las propiedades óptimas de protección, ofreciendo una barrera metálica impermeable a los rayos de luz ultra-violeta, al vapor de agua, los aceites y grasas, oxígeno y microorganismos. Cuando se utiliza para envasar productos sensibles, como, productos farmacéuticos o alimentos, el aluminio es higiénico, no tóxico, no contaminante y conserva el sabor del producto. La barrera de aluminio, juega el papel esencial de mantener el contenido fresco y protegerlo de las influencias externas, lo que garantiza una larga vida útil.

El papel de aluminio con el más mínimo espesor de aluminio de 0,006 mm a veces es suficiente para proporcionar las propiedades de barrera requeridas, es decir sigue siendo completamente impermeable. Por ejemplo, una bolsa flexible de aluminio de 4,8 g para jugo de frutas, es 33 veces más ligero que una botella tradicional.

La mayoría de las latas de bebidas están hechas de aluminio y su popularidad es fácil de entender, ya que el aluminio no imparte ningún sabor, se mantiene la carbonatación de entrada y salida de oxígeno, la luz y la humedad. También es irrompible y cualquier intento de posible manipulación son fácilmente detectables. Las latas de aluminio son envases perfectos, fuertes, ligeros, compactos e impermeables, seguros y reciclables.

Las latas de bebida de aluminio tienen un recubrimiento de polímero protector aplicado en el interior para prolongar la vida de almacenamiento. Esta capa de polímero asegura que nunca los ácidos y sales en las bebidas o alimentos realmente entren en contacto con el metal.

Una lata de bebida de aluminio de 0.33 l pesa aproximadamente sólo 13.6 gramos, mientras que una de hojalata pesa el doble. Esta ligereza no impide que sea un material resistente que se puede deformar sin romperse; un ejemplo tenemos, en que las paredes de una lata de

---

<sup>27</sup> Corporación Miyasato y Corporación Furukawa. [45] y [46]

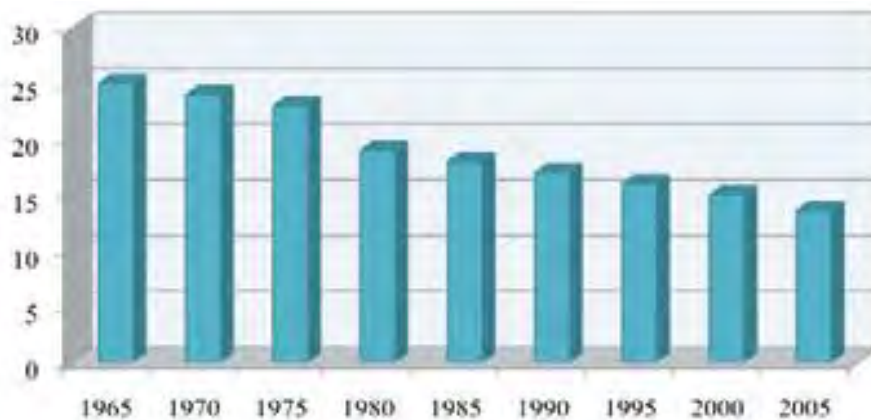
<sup>28</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [8], [9] y [20].

bebida de aluminio, pese a ser más delgadas que dos hojas de una revista, pueden resistir tres veces la presión de un neumático de carro.

El aluminio lidera la forma de "hacer más con menos", ésto ahorra costos de las materias primas y recursos energéticos.

Las latas de aluminio, hoy en día, necesitan el 40% menos del metal que las latas que se fabricaban hace 25 años y menos energía y materia prima. La siguiente figura 1.9 presenta cómo la industria del aluminio ha conseguido fabricar latas más ligeras conservando todas sus propiedades.

Figura 1.9. Evolución del peso en gramos de una lata de aluminio de 0.33 l.



Fuente: **Página web de la Asociación para el reciclado de productos de aluminio. [20]**

#### 1.4.4 Energía.<sup>29</sup>

Conductores eléctricos de aluminio o aleaciones de aluminio son ampliamente usados en: áreas de transmisión eléctrica y cables de distribución, sistemas de energía y subestaciones, el aluminio es adecuado para estos usos debido a su alta conductividad eléctrica, bajo peso y buena resistencia a la corrosión.

Desde 1945, el aluminio ha sustituido el cobre en las líneas de transmisión de alta tensión y en la actualidad es la forma más económica para transmitir energía eléctrica. El peso del aluminio es sólo un tercio el del cobre, y un kilogramo de aluminio puede conducir electricidad dos veces más que un kilogramo de cobre. Las líneas eléctricas de aluminio son, por tanto más ligeras y requieren menos y más ligeras estructuras de apoyo.

En Perú, el Ministerio de Energía y Minas, autorizó mediante decreto supremo la utilización de tuberías de aluminio revestido de polietileno, en lugar de tubería de cobre

<sup>29</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando la referencia [8] y [47].

para la distribución de gas natural residencial. Estas tuberías ya han sido utilizadas en el proyecto Calidda<sup>30</sup>.

#### **1.4.5 Usos Médicos.<sup>31</sup>**

El aluminio se utiliza en tratamientos de agua y medicina. El hidróxido de aluminio, se utiliza ampliamente como un antiácido para aliviar la irritación gástrica y ayudar en la curación de las úlceras, y el sulfato de aluminio es usado para purificar aguas contaminadas.

El aluminio, por su bajo peso, se considera como una buena alternativa para la construcción de prótesis.

#### **1.5 Industria del aluminio y el reciclaje.<sup>32</sup>**

La industria del aluminio es responsable de aproximadamente el 3% del uso mundial de electricidad, y la industria del aluminio está entre los sectores económicos que más energía consumen en el mundo, por lo tanto, tiene todo el interés en promover el reciclaje de aluminio como parte de su estrategia industrial.

Generalmente, el proceso de fundición da lugar a emisiones de 1.6 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de aluminio. Sin embargo, la industria ha ido continuamente aumentando su eficiencia energética. En todo el mundo, el promedio de uso de energía en la fundición se ha reducido de más de 50.000 kilovatios-hora en 1900 a 25.000 Kwh en 1950 y 16.000 kwh en el año 2000.

La industria emplea un enfoque de ciclo de vida para hacer frente a los desafíos del cambio climático, centrándose no sólo en la energía necesaria para producir los productos de aluminio, sino también en el ahorro de energía que se realiza a través de su uso y la reutilización. Por ejemplo, el uso de componentes de aluminio de peso ligero en un vehículo puede ahorrar hasta ocho por ciento en combustible, por cada reducción del 10% en peso.

---

<sup>30</sup> Red de distribución de gas natural, Lima – Perú.

<sup>31</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando la referencia [19].

<sup>32</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando la referencia [19].



## Capítulo 2

### Introducción a las aleaciones de aluminio

#### 2.1 Importancia de las aleaciones de aluminio.<sup>33</sup>

Como ya se ha comentado, las propiedades mecánicas del aluminio son claramente inferiores a las que presentan otros muchos materiales metálicos. Con el objetivo de mejorar las características, ya desde los inicios de la investigación sobre el aluminio, se procedió a experimentar diversas aleaciones con distintos elementos de forma más o menos arbitraria, pero cuyos resultados dieron lugar al descubrimiento y desarrollo de los tipos de aleaciones que posteriormente se generalizarían en el mercado.

El aluminio y sus aleaciones pierden parte de su resistencia a temperaturas elevadas, aunque algunas aleaciones retienen una buena resistencia a temperaturas entre 200 y 260°C. A temperaturas bajo cero, sin embargo, su resistencia aumenta sin pérdida de ductilidad siendo, por lo tanto, un metal particularmente útil en aplicaciones a bajas temperaturas.

Las aleaciones de aluminio son las más importantes entre las no ferrosas principalmente por su ligereza, se pueden fabricar mediante procesos comunes; se suministran en un amplio intervalo de tamaños y formas; resisten a la corrosión; son susceptibles de muy diversos acabados superficiales; poseen buena conductividad eléctrica y térmica, y son altamente reflectantes, tanto del calor como de la luz.

Existen propiedades muy importantes de las aleaciones de aluminio que tal vez no se valoran lo suficiente, nos referimos a la templabilidad, la estabilidad de forma durante y después del mecanizado, una buena aptitud al pulido, la soldabilidad, y la aptitud frente a los tratamientos superficiales.

---

<sup>33</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [1], [17] y [26].

Uno de los elementos que inicialmente se probó como endurecedor del aluminio fue el zinc. Aleaciones aluminio-zinc fueron rápidamente aplicadas, en proporciones hasta el 33% de elemento aleante. Las prometedoras perspectivas iniciales que mostraban estos materiales, con buenas características mecánicas, resultaron ser una decepción por su mal comportamiento frente a la corrosión, y muy particularmente a la corrosión bajo tensión, pero gracias a continuas investigaciones se consiguió corregir esta tendencia, a base de adicionar otros elementos.

## 2.2 Elementos de aleación e impurezas específicas.<sup>34</sup>

Los elementos más importantes de aleación e impurezas figuran en esta lista por orden alfabético como una revisión concisa de los efectos principales. Algunos de los efectos, particularmente con respecto a las impurezas, no están bien documentados y son específicos para aleaciones particulares o condiciones.

A continuación se describen las propiedades más relevantes que causan los principales elementos aleantes del aluminio.

**Antimonio:** El antimonio tiene una solubilidad sólida muy pequeña en el aluminio (<0,01%). El antimonio puede utilizarse en lugar de bismuto para contrarrestar la ruptura en caliente de aleaciones de aluminio-magnesio. En aleaciones hipereutécticas aluminio-silicio vaciadas, el antimonio impide la nucleación de silicio primario. Antimonio, en el rango de 0.05 a 0.2%, es usado para refinar el silicio eutéctico en aleaciones vaciadas.

**Arsénico:** El compuesto AsAl es un semiconductor. El arsénico es muy tóxico (como AsO<sub>3</sub>) y debe ser controlado a límites muy bajos, especialmente cuando el aluminio se utiliza como papel para envases de alimentos.

**Azufre:** Cantidades de 0.2 a 20 ppm están presentes en aluminio de grado comercial.

**Berilio:** se utiliza en aleaciones de aluminio que contiene magnesio para reducir la oxidación a temperaturas elevadas. Este elemento es usado en cantidades pequeñas (0.01 a 0.05%) en aleaciones de aluminio vaciadas para mejorar la fluidez y moldeabilidad en piezas de motor, como pistones y cabezas de cilindros.

**Bismuto:** Los metales de bajo punto de fusión, como el bismuto, plomo, estaño y cadmio se agregan a las aleaciones de aluminio para hacer aleaciones libres de maquinado. Estos elementos tienen una solubilidad limitada en aluminio sólido y forman una fase suave de bajo punto de fusión que promueve la rotura de la viruta y ayuda a lubricar la herramienta de corte. Una ventaja de bismuto es que su expansión en la solidificación compensa la contracción de plomo. Una relación de 1 a 1 de plomo-bismuto se utiliza en la aleación de aluminio y cobre, de 2011, y en la aleación de aluminio-magnesio-silicio, 6262. Se agregan

---

<sup>34</sup> Este apartado de ha elaborado utilizando las referencias [6] y [27].

pequeñas cantidades de bismuto (20 a 200 ppm) a las aleaciones aluminio-magnesio para contrarrestar los efectos perjudiciales de sodio en la ruptura en caliente.

**Boro:** Se utiliza en aluminio y sus aleaciones como un refinador de grano y para mejorar la conductividad por precipitación de vanadio, titanio, cromo y molibdeno. El boro puede ser utilizado solo (a niveles de 0,005 a 0,1%) como un refinador de grano durante la solidificación, pero se vuelve más efectivo cuando se utiliza con un exceso de titanio. Los refinadores de grano comercial comúnmente contienen titanio y boro en una relación de 5/1.

**Cadmio:** Es un elemento con un punto de fusión relativamente bajo que tiene un uso limitado en el aluminio. Hasta el 0,3% Cd se puede agregar a las aleaciones de cobre-aluminio para acelerar la tasa de endurecimiento por envejecimiento, aumentar la fuerza, y aumentar la resistencia a la corrosión. A niveles de 0,005 a 0,5%, se ha utilizado para reducir el tiempo de envejecimiento de las aleaciones de aluminio-zinc-magnesio.

**Calcio:** Tiene muy baja solubilidad en el aluminio y forma el intermetálico  $\text{CaAl}_4$ . El calcio se combina con el silicio para formar  $\text{CaSi}_2$ , que es casi insoluble en el aluminio y, por lo tanto, aumenta ligeramente la conductividad del metal de calidad comercial. Su efecto en las aleaciones aluminio-silicio es para aumentar la fuerza y disminuir la elongación.

**Carbono:** Puede producirse con poca frecuencia como una impureza en el aluminio en forma de oxcarburos y carburos, de los cuáles el más común es  $\text{Al}_4\text{C}_3$ . El  $\text{Al}_4\text{C}_3$  se descompone en la presencia de agua y vapor de agua y esto puede producir picaduras en la superficie.

**Cobalto:** No es un elemento que se añade comúnmente a las aleaciones de aluminio. Se adiciona a algunas aleaciones de aluminio-silicio que contienen hierro, donde transforma la fase beta acicular (aluminio, hierro y silicio) a una fase más redondeada (aluminio, cobalto, hierro), lo que mejora la resistencia y elongación.

**Cobre:** Las aleaciones aluminio-cobre contienen de 2 a 10% de Cu, generalmente con otras adiciones, forma importantes familias de aleaciones. La adición de cobre al aluminio aumenta la colabilidad, disminuye la resistencia a la corrosión, permite aumentar la resistencia mecánica y la dureza de la aleación en bruto, mediante tratamientos térmicos de solubilización, temple y recocido. Aleaciones que contienen de 4 a 6% de cobre presentan la mejor respuesta frente a los tratamientos térmicos y dependiendo de la influencia de otros constituyentes el esfuerzo es máximo.

**Circonio:** Adiciones de circonio de 0.1 a 0.3% se utilizan para formar un precipitado fino de partículas intermetálicas que inhiben la recristalización. También se utilizan para reducir el tamaño de grano en la colada.

**Cromo:** Se presenta como una impureza menor en aluminio de pureza comercial (5 a 50 ppm). Tiene un gran efecto en la resistencia eléctrica. El cromo se añade comúnmente a muchas de las aleaciones de aluminio: aluminio-magnesio, aluminio-magnesio-silicio, y los grupos de aluminio-zinc-magnesio, en la que se agrega en cantidades por lo general no

superior a 0,35%. En cantidades superiores tiende a formar componentes muy gruesos con otras impurezas o adiciones, como el manganeso, hierro y titanio. El cromo se utiliza para controlar la estructura de grano, para evitar el crecimiento del grano en las aleaciones aluminio-magnesio, y para evitar la recristalización de aluminio-magnesio-silicio o de aleaciones de aluminio-zinc-magnesio durante el trabajo en caliente o tratamiento térmico.

**Estaño:** Es usado como elemento de aleación a partir de concentraciones de 0.03 % en aleaciones forjadas a concentraciones de 25% en aleaciones de fundición. Pequeñas cantidades de estaño (0.05%) aumentan en gran medida la respuesta de las aleaciones aluminio-cobre al envejecimiento artificial después de un tratamiento de solubilización. El resultado es un incremento en la resistencia y una mejora en la respuesta frente a la corrosión. Las concentraciones más altas de estaño provocan fisuración en caliente de aleaciones aluminio-cobre. Si hay pequeñas cantidades de magnesio presente, las características de envejecimiento artificial se reducen notablemente, probablemente porque el magnesio y el estaño forman una segunda fase no coherente.

**Estroncio:** Cantidades de 0.01 a 0.1 ppm se encuentran en aluminio de grado comercial.

**Fósforo:** Es una impureza menor (1 a 10 ppm) en aluminio de grado comercial. Su solubilidad en aluminio fundido es muy baja (~ 0.01% en 660°C) y considerablemente menor en estado sólido. El fósforo se utiliza como un modificador en las aleaciones aluminio-silicio hipereutécticas, donde el aluminio-fosfuro actúa como núcleo del silicio primario, y refina el silicio y mejora la maquinabilidad.

**Galio:** es una impureza en aluminio y suele estar presente en niveles de 0,001 a 0,02%. En estos niveles su efecto sobre las propiedades mecánicas es bastante pequeño. A nivel de 0,2%, se ha encontrado que el galio afecta a las características de corrosión y la respuesta al ataque químico y abrillantado de algunas aleaciones.

**Hidrógeno:** Tiene una mayor solubilidad en estado líquido a la temperatura del punto de fusión. Debido a esto, durante la solidificación se puede formar porosidad. El hidrógeno es producido por la reducción del vapor de agua en la atmósfera por el aluminio y por la descomposición de hidrocarburos.

**Hierro:** Es considerado uno de los elementos de impureza más nocivos presente en el aluminio. Su baja solubilidad en aleaciones de aluminio da como resultado la presencia de compuestos intermetálicos. La solubilidad del hierro en estado sólido es muy baja, 0.03%<Fe<0.05% a la temperatura eutéctica. Para un contenido de hierro entre 0.05%<Fe<0.7%, se cree que forman fases en forma de agujas pequeñas, después de la eutéctica de silicio. Si el contenido de Fe>1% (crítico), aumenta la porosidad y provoca la aparición de intermetálicos de hierro más grandes y gruesos.

**Litio:** El nivel de impurezas de litio es del orden de unas pocas ppm, pero a un nivel de menos de 5 ppm puede causar la decoloración del papel de aluminio en condiciones de humedad. Impurezas de litio aumentan en gran medida la velocidad de oxidación del aluminio fundido y alteran las características superficiales de los productos forjados.

**Magnesio:** Su solubilidad sólida máxima en aluminio es 17.4%, pero el contenido de magnesio en las aleaciones actuales forjadas no excede el 5.5%. El magnesio precipita preferentemente en los límites de grano como una fase altamente anódica ( $Mg_5Al_3$  o  $Mg_5Al_8$ ) que produce susceptibilidad al agrietamiento intergranular y corrosión bajo tensión. La adición de magnesio aumenta notablemente la resistencia del aluminio sin disminuir indebidamente la ductilidad.

**Manganeso:** Se considera normalmente como una impureza en las composiciones de fundición, y se mantiene a niveles bajos en la mayoría de composiciones de moldeo por gravedad. El manganeso es un elemento importante en las aleaciones para forja. En ausencia de endurecimiento, el manganeso no ofrece beneficios significativos en las aleaciones de aluminio fundido. Incrementa las propiedades mecánicas y reduce la calidad de embutición.

**Molibdeno:** Aparece un nivel muy bajo (0,1 a 1,0 ppm) como impurezas. Se utiliza una concentración de 0,3%, como refinador de grano.

**Níquel:** La solubilidad sólida de níquel en aluminio no excede el 0,04%. Para contenidos superiores, aparecen fases intermetálicas insolubles, por lo general en combinación con el hierro. Con Níquel (hasta el 2%) aumenta la resistencia del aluminio de alta pureza, pero reduce la ductilidad. Las Aleaciones binarias de aluminio-níquel ya no están en uso, pero el níquel se agrega a aleaciones aluminio-cobre y aleaciones de aluminio-silicio para mejorar la dureza y la resistencia a temperaturas elevadas y para reducir el coeficiente de expansión.

**Plata:** Tiene una solubilidad sólida extremadamente alta en el aluminio (arriba de 55%). Debido al costo, aleaciones binarias aluminio-plata no son usadas, pero adiciones pequeñas (0.1 a 0.6%) son eficaces para mejorar la resistencia a la tensión y la resistencia a la corrosión en aleaciones aluminio-zinc-magnesio.

**Plomo:** El plomo se añade sobre el nivel del 0,5% con la misma cantidad que en algunas aleaciones de bismuto (2011 y 6262) para mejorar la maquinabilidad.

**Silicio:** El efecto excepcional del silicio en aleaciones de aluminio es la mejora de las características de fundición. La adición de silicio al aluminio puro mejora drásticamente la fluidez, resistencia al desgarro en caliente, las características de la alimentación y la resistencia a la corrosión. El Silicio debido a que se disuelve poco en el aluminio, suele aparecer sin combinar, o formando compuestos complejos, junto con el hierro, de Fe-Al-Si que se depositan en las juntas de grano. Estas impurezas actúan en forma de entalla, disminuyendo por tanto la ductilidad y tenacidad aunque aumentan ligeramente el límite elástico.

**Titanio:** Cantidades de titanio de 10 a 100 ppm son encontradas en aluminio de pureza comercial. El titanio reduce la conductividad eléctrica del aluminio. Es ampliamente utilizado como refinador de grano en las aleaciones de aluminio fundido, a menudo en combinación con pequeñas cantidades de boro.

**Zinc:** Las aleaciones aluminio-zinc se conocen desde hace muchos años, pero la susceptibilidad a la corrosión de las aleaciones forjadas ha restringido su uso. Aleaciones aluminio-zinc que contienen otros elementos ofrecen la combinación más alta de propiedades de tracción en las aleaciones de aluminio forjado. Los esfuerzos por superar las limitaciones antes mencionadas han tenido éxito, y estas aleaciones a base de aluminio-zinc se utilizan comercialmente de manera creciente.

### 2.3 Clasificación de las aleaciones de aluminio.<sup>35</sup>

Es conveniente dividir a las aleaciones de aluminio en dos categorías principales: productos de forjados y productos de fundición. Dentro de estas dos categorías la clasificación de las aleaciones de aluminio ha ido cambiando mucho a través de los países y del tiempo, y esto originó dificultades al momento de su estandarización.

Muchas de las sociedades que estaban dedicadas a la ingeniería y la investigación establecieron procedimientos para clasificarlas. Entre las instituciones más importantes se pueden mencionar: la *International Alloy Designation System* (IADS) para productos forjados, la *American National Standards Institute* (ANSI); estas dos basadas en la *Aluminum Association of the United States*. Existen otras como la *International Organization for standardization* (ISO) y la *Unified Numbering System* (USN).

El Sistema de Designación del aluminio y aleaciones de aluminio incorpora la forma del producto (forjados, vaciados a piezas, o vaciados en lingotes) y sus respectivos tratamientos (con la excepción del vaciado en lingotes, los cuales no tienen clasificación por temperatura), ambos registrados por la *Aluminum Association* dentro del estándar ANSI H35.1, con respecto a la designación y composición de las aleaciones de aluminio y su tratamiento, registradas en los Estados Unidos.

Las designaciones utilizadas en este trabajo, se basan en ANSI, que es una de las instituciones más reconocidas internacionalmente.

#### 2.3.1 Aleaciones para forja

Las aleaciones para forja se conforman por deformación plástica y tienen composiciones y microestructuras significativamente diferentes a las utilizadas en molde. Estas diferencias en las composiciones reflejan las diferentes necesidades de los dos procesos de fabricación.

##### 2.3.1.1 Designación de aleaciones de aluminio para forja.

La *Aluminium Association* adoptó un sistema de designación numérico para el aluminio y las aleaciones de aluminio forjadas, consistente en cuatro dígitos.

El primer dígito de la designación identifica el tipo de aleación, que se refiere al principal elemento de aleación:

---

<sup>35</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [6], [26]

- Serie 1xxx, indica un aluminio sin alear de pureza 99.00% o mayor.
- Serie 2xxx, cobre como elemento principal de aleación.
- Serie 3xxx, manganeso como elemento principal de aleación.
- Serie 4xxx, silicio como elemento principal de aleación.
- Serie 5xxx, magnesio como elemento principal de aleación.
- Serie 6xxx, magnesio y silicio son los elementos principales de aleación.
- Serie 7xxx, zinc como elemento principal de aleación, pero otros elementos como el cobre, magnesio, cromo y zirconio se pueden especificar.
- Serie 8xxx, aleaciones con estaño y algo de litio, caracterizando diversas composiciones.
- Serie 9xxx, sin uso (sin asignación hasta el presente).

El segundo dígito en el número de la aleación indica los límites de impureza, si el dígito es cero no contiene impurezas, si el valor es de uno a nueve indica un control especial de una o más impurezas, por ejemplo las aleaciones 5053 y 5453 varían muy poco en su composición, así como también la 7073 y 7473.

Los últimos dos dígitos son significativos en la serie 1xxx, pero no en otras aleaciones. En las aleaciones 1xxx, la pureza mínima del aluminio se muestra por esos dígitos, por ejemplo la aleación 1150, significa una pureza del aluminio del 99.50%, otra por ejemplo, la aleación 1300, significa una pureza de aluminio del 99.00%.

En las series del dos hasta el ocho los últimos dos dígitos no tienen ningún significado en especial, sólo sirven para identificar las diferentes aleaciones en el grupo, por ejemplo 3003, 3004, 3005, son completamente diferentes, así mismo las aleaciones 6061, 6063, son diferentes.

### **2.3.2 Aleaciones para moldeo**

En las aleaciones para moldeo debe predominar, fundamentalmente, la exigencia de que las propiedades de la colada sean aprovechables. Por esta razón se diferencian mucho en su composición estas aleaciones de las de forja.

#### **2.3.2.1 Designación de las aleaciones vaciadas de aluminio.<sup>36</sup>**

La ANSI emplea cuatro números para las aleaciones vaciadas, pero incorpora un punto decimal antes del último dígito para marcar la diferencia del vaciado ya sea directo o en lingotes.

---

<sup>36</sup> Este apartado ha sido elaborado utilizando las referencias [6], [22] y [26]

El primer dígito indica el grupo de la aleación. Para las series 2xx.x al 9xx.x, el grupo de aleación es determinada por el elemento de aleación presente en mayor porcentaje.

- Serie 1xx.x, pertenece al aluminio sin alear.
- Serie 2xx.x, cobre como mayor elemento de aleación.
- Serie 3xx.x, silicio con cobre o magnesio son los mayores elementos aleantes.
- Serie 4xx.x, silicio como mayor elemento de aleación.
- Serie 5xx.x, magnesio como mayor elemento de aleación.
- Serie 6xx.x, no está en uso.
- Serie 7xx.x, zinc como mayor elemento de aleación.
- Serie 8xx.x, titanio como mayor elemento de aleación.
- Serie 9xx.x, otros elementos.

El segundo y tercer dígito indican en la serie 1xx.x el porcentaje mínimo de pureza que excede al 99%, en las series del 2xx.x al 9xx.x no tiene especial significado sirviendo únicamente para identificar diferentes aleaciones en el grupo.

El último dígito, que está a la derecha del punto decimal, indica la forma del producto, por ejemplo, xxx.0 indica que fue vaciada directamente en molde, la xxx.1 indica que fue vaciada en lingote con límites de composición química, y la xxx.2 indica los lingotes cuya composición química difiere de los límites establecidos para xxx.1 pero que está comprendida entre los límites nominales para lingotes.

Si la aleación fue modificada o tiene ciertas impurezas se indica con un serial de letras delante de la designación de la aleación. La designación de las letras se hace en secuencia alfabética omitiendo las letras I, O, Q y X. La letra X se reserva para aleaciones experimentales.

#### **2.4 Sistema de designación para tratamientos del aluminio y sus aleaciones.<sup>37</sup>**

El sistema de designación utilizado en los Estados Unidos es empleado para todas las formas de producto ya sea forjado o vaciado (con excepción del vaciado en lingote). El sistema está basado en la secuencia de tratamientos mecánicos, térmicos o la combinación de ambos. La designación del tratamiento sigue a la de la aleación separada de un guión.

La designación de un tratamiento básico consiste en una letra individual mayúscula. La subdivisión de los tratamientos básicos se indican con uno o más dígitos siguiendo a la letra, estos dígitos designan una secuencia específica de tratamientos que producen una combinación de propiedades en el producto.

Las condiciones durante el tratamiento térmico (por ejemplo, tiempo, temperatura y velocidad de enfriamiento) utilizados para producir un temple dado en una aleación pueden diferir de las empleadas para producir el temple mismo en otra aleación.

---

<sup>37</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [6], [22], [26], [48] y [49].



La designación para los tratamientos más comunes se muestra a continuación.

F: Condición de fabricado. Esto se aplica a los productos moldeados por trabajo en frío, trabajo en caliente, o procesos de fundición en la que no se emplea ningún control especial sobre las condiciones térmicas o de endurecimiento. Para productos forjados, sin límites de propiedades mecánicas.

O: Recocido. Es el temple más suave de los productos de aleación forjados. Se aplica a productos forjados que son recocidas para obtener menor resistencia en el temple. La letra O puede ser seguido por un dígito distinto de cero.

W: Tratados térmicamente en solución; es un temple inestable que se aplica sólo a aleaciones que envejecen espontáneamente a temperatura ambiente después del tratamiento térmico en solución.

Las piezas y productos en bruto (designación F) de las aleaciones de aluminio se pueden mejorar mediante dos procedimientos distintos: a) por deformación en frío; b) por medio de tratamientos térmicos.

H: Endurecimiento por deformación; se aplica a productos susceptibles de incrementar sus propiedades mecánicas mediante trabajo en frío (es decir, los productos han sido reforzados por endurecimiento por deformación), con o sin tratamiento térmico complementario para producir una cierta reducción en la resistencia. El primer dígito después de la H indica la secuencia específica de operaciones básicas.

H1: Solamente endurecido por deformación; el segundo dígito designa la cantidad de trabajo en frío realizada, y el número 8 representa la condición de dureza total; por lo tanto, una dureza media es H14, una dureza de un cuarto es H12, etc. Los temples extra duros se designan con el 9.

H2: Endurecido por deformación y luego recocido parcialmente; se aplica a productos trabajados en frío para obtener un temple más duro y luego, mediante recocido parcial, se les reduce su resistencia al nivel deseado.

H3: Endurecido por deformación y luego estabilizado; Se aplica sólo a aleaciones que contienen magnesio a las cuales se da un calentamiento a baja temperatura para estabilizar sus propiedades.

Para el procedimiento de mejoramiento por deformación en frío, existen otras designaciones, pero en este trabajo sólo se mencionan las más comunes.

T: Tratamiento de Solubilidad; se aplica a productos tratados térmicamente, con o sin endurecimiento por deformación suplementario, para producir temples estables.

T1: Enfriamiento desde una temperatura elevada, provocando un proceso de envejecimiento natural.

T2: Temple; o enfriamiento rápido después de la transformación en caliente (sin solubilización específica).

T3: Tratamiento de solubilización, trabajado en frío.

T4: Tratamiento de solubilización y envejecido naturalmente a condiciones estables.

T5: Tratamiento térmico de precipitación. Enfriamiento desde una temperatura elevada en el proceso de conformado y envejecimiento artificial.

T6: Tratamiento de solubilización y luego envejecimiento artificial.

T7: Tratamiento de solubilización, temple y estabilización.

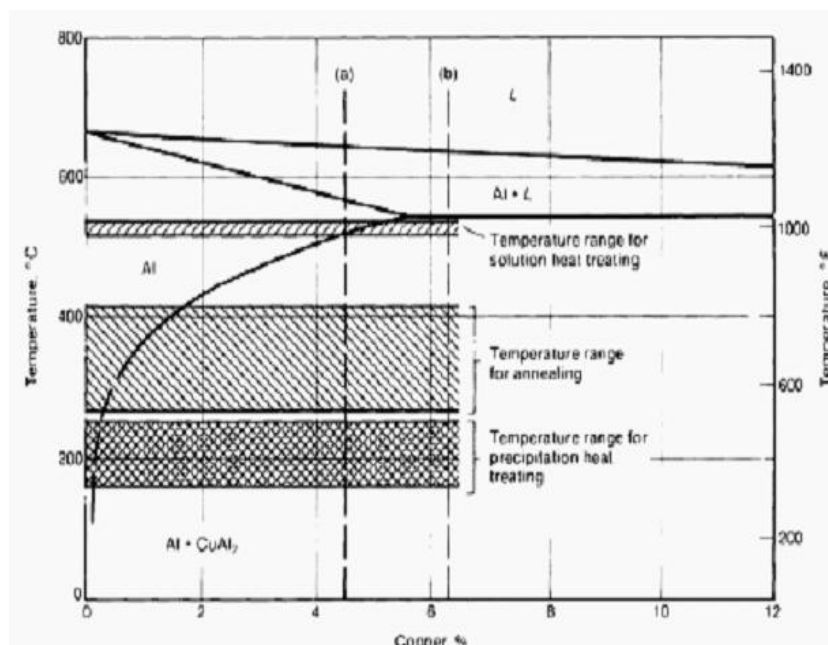
T8: Tratamiento de solubilización, trabajado en frío y envejecimiento artificial.

T9: Tratamiento de solubilización, envejecimiento artificial y trabajado en frío.

T10: Enfriado directamente de un proceso de formado a alta temperatura, trabajado en frío y envejecido artificial.

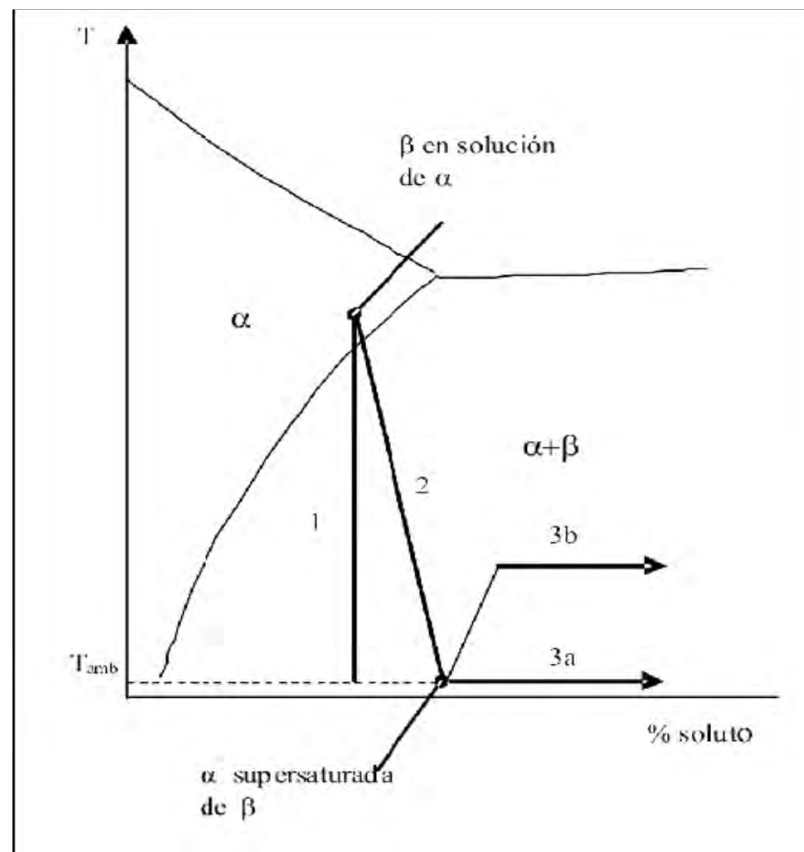
En la figura 2.1. se muestran los rangos de temperaturas para el tratamiento térmico de solubilización, tratamiento térmico de temple y tratamiento térmico de precipitación o envejecimiento. El rango de temperatura para el tratamiento de solubilización es debajo del punto de fusión eutéctico de 548 °C (1018°F) para 5.65 wt% Cu.

Figura 2.1. **Diagrama de fase binario aluminio-cobre.**



Fuente: [48]

Figura 2.1. Tratamiento de endurecimiento por precipitación. 1. Solubilización, 2. Templado, 3a. Envejecimiento natural, 3b. Envejecimiento artificial.



Fuente: [48]

## Capítulo 3

### Aleaciones de aluminio vaciadas

#### 3.1 Aspectos generales<sup>38</sup>

Las fundiciones de aluminio han jugado un rol integral en el crecimiento de la industria del aluminio desde sus inicios a finales del siglo XIX.

Las aleaciones de aluminio para fundición han sido desarrolladas ya que proporcionan calidades de fundición idóneas, como buena colabilidad (aptitud para llenar correctamente la cavidad de un molde), contracción relativamente pequeña y la poca tendencia a la formación de fisuras en la contracción, así como propiedades mejoradas de resistencia a la tensión, ductilidad y resistencia a la corrosión.

Se siguen desarrollando y mejorando procesos de fundición para ampliar las capacidades de las fundiciones en las nuevas aplicaciones técnicas y comerciales ayudando al fundidor a conseguir una producción económica y fiable, en el que las piezas siempre cumplan con los requisitos especificados.

#### 3.2 Procesos de fundición<sup>39</sup>

Hoy en día, las piezas de fundición de aleación de aluminio se producen en cientos de composiciones y son fundidas principalmente por tres procesos: fundición en arena (en arena verde o arena seca), fundición en molde metálico permanente (bajo gravedad y bajo presión centrífuga solamente) y fundición por presión o inyección (grandes presiones).

La amplia aplicación de procesos de fundición y las variaciones del proceso en la producción de composiciones de base de aluminio, requiere una comprensión completa de

---

<sup>38</sup> Este apartado ha sido elaborado utilizando las referencias [30] Y [31]

<sup>39</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [30] y [31]

las características del proceso y de sus capacidades. La selección del método de fundición adecuado se basa en las capacidades de cada proceso en relación con el diseño y los requisitos especificados para cada parte. En la mayoría de los casos, las piezas de fundición pueden ser fácilmente producidas por más de una técnica. En estos casos, lo que determina la elección del proceso es la economía, en gran medida, en base al volumen de producción. Para otros casos, los requisitos específicos de calidad o de ingeniería es lo que restringe la elección del proceso.

Por ejemplo, se pueden fundir piezas que pueden variar desde pequeñas piezas de prótesis dental, con peso de gramos, hasta los grandes bastidores de máquinas de varias toneladas, de forma variada, sencilla o complicada, que son imposibles de fabricar por otros procedimientos convencionales, como forja, laminación, etc.

### **3.2.1 Fundición en molde de arena.<sup>40</sup>**

Es el proceso más sencillo, versátil y menos costoso de las fundiciones del aluminio. Se hace el molde en arena consolidada por un apisonado manual o mecánico alrededor de un molde, el cual es extraído antes de recibir el metal fundido. A continuación se vierte la colada, y cuando solidifica se destruye el molde y se granalla la pieza. Este método de fundición es normalmente elegido para la producción de:

- Cantidades pequeñas de piezas fundidas idénticas
- Piezas fundidas complejas con núcleos complicados
- Piezas estructurales fundidas de gran tamaño.

### **3.2.2 Fundición con molde metálico permanente<sup>41</sup>**

También llamado coquilla, sirve para obtener mayores producciones. En este método se vierte la colada del metal fundido en un molde metálico permanente bajo gravedad y bajo presión centrífuga solamente. Las piezas fundidas así tienen una estructura de grano más fino, y son más resistentes que las piezas fundidas con moldes de arena, debido a que la velocidad de enfriamiento es más rápida. Además, las piezas fundidas en molde permanente poseen generalmente menores contracciones y porosidad que las piezas fundidas en arena. Sin embargo, los moldes permanentes tienen limitaciones de tamaño, y para piezas complejas puede resultar caro, difícil o imposible.

### **3.2.3 Fundición por presión o inyección<sup>42</sup>**

Exige un molde específico para cada pieza y una máquina de inyectar muy cara, ya que permite obtener piezas de una elevada precisión dimensional y excelentes acabados

---

<sup>40</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando la referencia [31].

<sup>41</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [31] y [32].

<sup>42</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [31] y [32].

superficiales que requieren poca o nula mecanización posterior, por lo cual es muy utilizado en la fabricación de piezas complejas de grandes series (bombas de gasolina, carburadores).

Se funden piezas idénticas al máximo ritmo de producción forzando el metal fundido bajo grandes presiones en los moldes metálicos. Las dos partes de la matriz de metal son engatilladas de forma segura para poder resistir la alta presión. El aluminio fundido es obligado a repartirse por las cavidades de la matriz. Cuando el metal se ha solidificado, las matrices son desbloqueadas y abiertas para extraer la pieza fundida caliente. Las ventajas de la fundición a presión son:

- Las piezas están casi acabadas y pueden producirse a un alto ritmo.
- Las tolerancias adimensionales de cada parte de la pieza fundida pueden ser mantenidas más sólidamente.
- Es posible la obtención de superficies suaves
- El proceso puede ser automatizado.

### 3.3 Fundamentos de solidificación<sup>43</sup>

La ciencia de la solidificación ha evolucionado a partir de la necesidad de comprender y desarrollar mejores procesos de fundición.

Los medios principales que se hallan a disposición para el control de las propiedades de las aleaciones son las transformaciones de fase. Casi todos los metales y aleaciones, en cierto momento de su procesamiento, se encuentran en estado líquido, el cual solidifica cuando se enfría a una temperatura inferior a la de solidificación. Las estructuras producidas durante este proceso, afectan las propiedades mecánicas e influyen en el tipo de procesamiento subsecuente para lograr las propiedades finales.

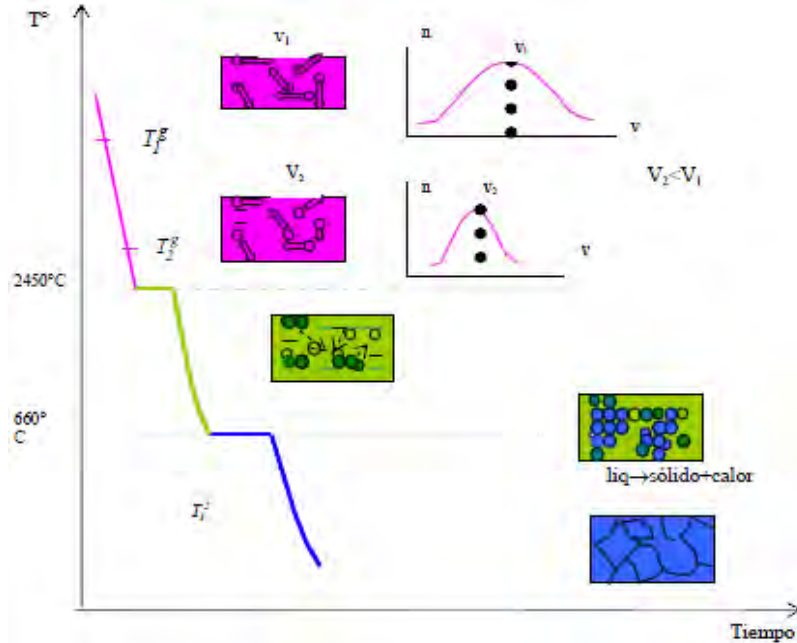
La rapidez con que este proceso puede ocurrir, dependerá principalmente de la rapidez con que el calor generado por el cambio de fase sea removido.

En la figura 3.1 se muestra la curva de enfriamiento de equilibrio del aluminio a una presión de una atmósfera.

---

<sup>43</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [33] y [36].

Figura 3.1. Curva de Solidificación del aluminio



Fuente: **La Solidificación [36]**

Según desciende la temperatura, hasta llegar a  $2450^\circ\text{C}$ , transcurre un tiempo en que el metal permanece a temperatura constante; ese es el momento de cambio de fase (gas-líquido), hay equilibrio:  $\text{gas} \leftrightarrow \text{líq}$ . Luego a  $660^\circ\text{C}$  ocurre lo mismo, cambio de fase de líquido a sólido:  $\text{líq} \leftrightarrow \text{sólido}$ .

La solidificación requiere de dos pasos: nucleación y crecimiento. La nucleación ocurre cuando una pequeña partícula sólida se forma dentro del líquido. El crecimiento del sólido se lleva a cabo cuando los átomos del líquido se unen al sólido diminuto hasta consumir el líquido.

### 3.3.1 Subenfriamiento y cambio de estado<sup>44</sup>

La temperatura de solidificación  $T_E$  para un metal puro es constante. Para que la solidificación se realice plenamente, se necesita un cierto grado de subenfriamiento respecto a dicha temperatura de equilibrio, ya que cuando líquido y sólido coexisten a la temperatura de solidificación, se establece un equilibrio (líquido  $\leftrightarrow$  sólido + Q Calorías), que para pasar hacia el sólido, tiene que absorber el calor desprendido Q. De lo contrario, la solidificación se detendría porque a la temperatura  $T_E$ , unos átomos llegarían al sólido y otros abandonarían éste, a igual velocidad.

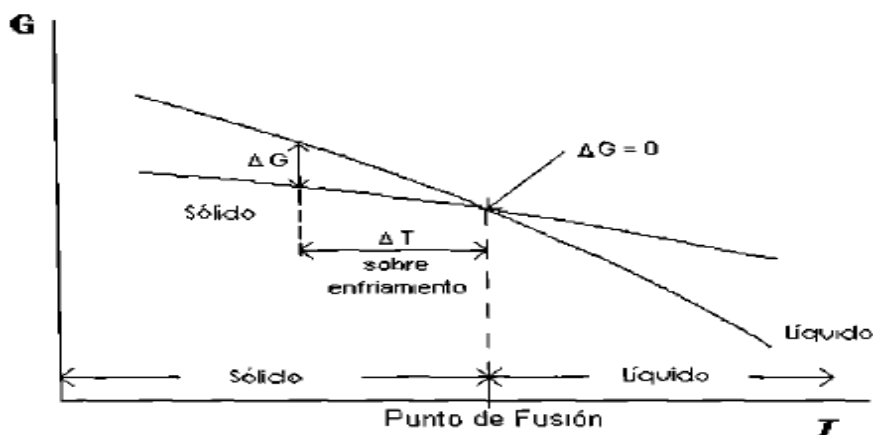
Alcanzando un cierto subenfriamiento, el metal solidifica. Pero no lo hace de inmediato, sino que se requiere un cierto tiempo para el paso total al estado sólido. Se da un proceso de

<sup>44</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [34] y [35].

formación y crecimiento del sólido a expensas del líquido durante todo su periodo en que coexisten ambas fases.

La figura 3.2 indica la energía libre (G), que hay en un líquido y un sólido a diferentes temperaturas.

Figura 3.2. Variación de la energía libre con respecto a la temperatura para un metal puro.



Fuente: Esferoidización del eutéctico en las aleaciones aluminio silicio [34].

Entre dos fases o agrupaciones atómicas A (sólida) y B (líquida) formadas por átomos de un mismo metal en contacto por medio de la intercara (ab), la fase A crecerá a expensas de la fase B, siempre que por unidad de tiempo pasen más átomos de B al estado A, que átomos de A al estado B. Sólo toman parte en el flujo, en ambas direcciones, átomos de la fase A o de la fase B próximos a la intercara.

Durante la solidificación el comportamiento de la superficie de una fase difiere de su interior, a causa de estos rápidos cambios que tienen lugar en la intercara.

En este caso, suponemos, que el vaciado no tiene las mismas condiciones en todas sus regiones. Porque hay partes del líquido vaciado en contacto con las paredes del molde, por ende, existe mayor pérdida de calor en éstas. En otras regiones el enfriamiento es mucho más lento, por no tener contacto alguno con paredes o con el mismo aire de la superficie, esto ocurre en el centro del vaciado. También hay diferencias al estar el líquido en contacto con una superficie de metal y con una de arena, ya que el metal permite una mayor pérdida de calor. Además de que el molde está en estado sólido, proporcionando puntos donde la solidificación puede llevarse a cabo más fácilmente. La existencia de poros o partículas sueltas en las paredes del molde sirven como nichos donde se puede generar más fácilmente la nucleación.

Con todo esto, no es difícil imaginar que habrá regiones, en donde se den primero las condiciones para un cambio de estado físico. En éstas existe el subenfriamiento necesario, para generar el cambio en magnitud de la energía libre requerida, para la permanencia en una posición fija de los átomos sólidos, antes líquidos. Ahora sus fuerzas de atracción



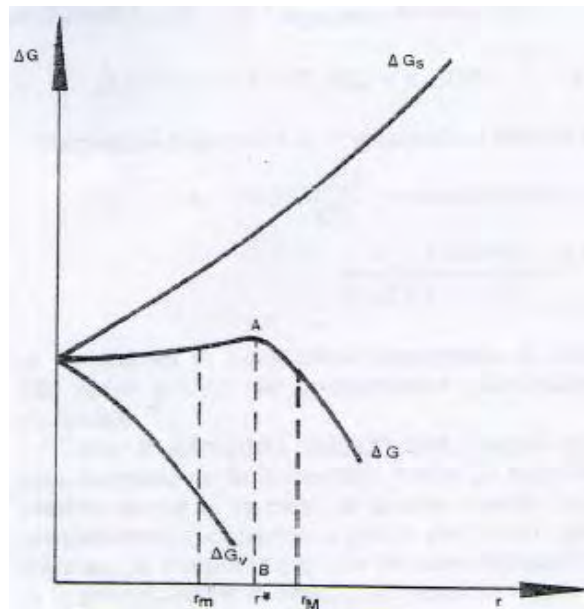
sobrepasan la barrera energética de repulsión, que no permitía la permanencia de éstos en un lugar fijo.

La energía libre de transformación crítica, para que un conjunto de átomos forme lo que se conoce como un embrión de fase sólida, es aquella que tendrá que oponerse a las fuerzas de repulsión que dominan el estado líquido. Entrando en más detalle, en ocasiones los átomos del líquido se reúnen y ordenan como los que están en el estado sólido, pero no son los suficientes como para reunir la atracción necesaria entre todos y conservar este estado temporal, disolviéndose nuevamente en la fase líquida, quizás porque el enfriamiento no fue el adecuado. Aquí es donde se toma el concepto de radio crítico, que es aquel radio mínimo, que debe alcanzar la aglomeración de átomos líquidos en transición, para poder conservar un estado sólido y proseguir su crecimiento.

Dado que los átomos periféricos no tienen igual coordinación que los átomos centrales, la variación de energía libre global para solidificar una esfera de radio  $r$  consta de 2 sumandos,  $\Delta G = \Delta G_S + \Delta G_V$ , Siendo  $\Delta G_S$  y  $\Delta G_V$  la energía libre de superficie y energía libre de sólido esférico (formación de volumen) respectivamente, y  $\Delta G$  el cambio de energía libre total o global.

En la figura 3.3, se muestra la variación de  $\Delta G_S$  y  $\Delta G_V$ , a la temperatura  $T_1$ , en función del radio.

Figura 3.3.  $\Delta G$  al solidificar una esfera de radio  $r$  a la temperatura  $T_1$ .  
Radio crítico  $r^*$ .



Fuente: **Pero Sanz**

El germen tiene la posibilidad de crecer, cuando su radio  $r$  sea  $r^*+1$ , porque eso implica disminución de la energía libre. Los radios menores a  $r^*$  no pueden crecer porque eso implica un aumento de la energía libre y eso es imposible para llegar a la solidificación.

Para una temperatura  $T_1$ , las agrupaciones espontáneas de átomos que no alcancen el tamaño crítico  $r^*+1$  átomo, desaparecerán por colisión de otros átomos. Sólo aquellas agrupaciones cuyo radio sea igual o mayor a  $r^*+1$  átomo, podrán crecer.

Si el grado de subenfriamiento es mayor ( $\Delta T$ ), será más factible, que se forme un embrión capaz de alcanzar el radio crítico necesario para permanecer en el estado sólido.

### 3.3.2 Nucleación<sup>45</sup>

Al hecho de que se unan y ordenen átomos, pasando del estado líquido al sólido en una forma de núcleo del tamaño necesario para permanecer en estado sólido, se le llama nucleación. Antes de alcanzar el tamaño necesario a los átomos aglomerados se les nombra normalmente como embrión, el cual es un núcleo de menor tamaño.

Estos conglomerados atómicos no son permanentes sino que se forman y destruyen rápidamente, su duración depende de la temperatura del medio y de su tamaño, de tal modo que cuando mayor es la temperatura, mayor es la energía cinética de los átomos y más corta la vida de los grupos. Los conglomerados pequeños son muy inestables, porque están formados por un número pequeño de átomos y la pérdida de uno de ellos puede ocasionar su destrucción. A medida que disminuye la temperatura del líquido, los átomos pierden libertad de movimiento, lo que da lugar a un aumento de la vida del conglomerado, coexistiendo al mismo tiempo un número mayor de ellos; este aumento en la vida del conglomerado está acompañado de un aumento gradual de su tamaño, si esta partícula alcanza un tamaño crítico, será considerado un núcleo, a partir del cual crecerán los cristales metálicos.

Cuando se inicia la nucleación, ésta se realiza generalmente en alguna discontinuidad de la fase matriz, como una impureza o algún elemento de adición; pero puede darse el caso de que el núcleo se forme en una región uniforme de la fase matriz. La distinción entre estos dos tipos de nucleación es bastante importante y se denominan, nucleación heterogénea y nucleación homogénea, respectivamente.

#### 3.3.2.1 Nucleación homogénea<sup>46</sup>

Si la solidificación se genera con un medio de enfriamiento cercano a la temperatura de fusión ( $T_m$ ) se tendrá una solidificación muy lenta. Entre más cercana sea a la  $T_m$  menor será el subenfriamiento. El nivel de energía del líquido no ha disminuido lo suficiente porque la variación de temperatura ( $\Delta T$ ) es pequeño. La nucleación homogénea ocurre cuando el subenfriamiento se hace lo suficientemente grande para permitir que el embrión exceda el tamaño crítico.

---

<sup>45</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [34].

<sup>46</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [33].

### 3.3.2.2 Nucleación heterogénea<sup>47</sup>

Las impurezas que están en contacto con el líquido, ya sea en las paredes del molde o suspendidas en él, proporcionan una superficie en donde se puede formar el sólido, es decir, sirven de soporte al agrupamiento de átomos, para formar núcleos con mayor facilidad. Se necesitan reunir sólo unos cuantos átomos para producir una partícula sólida con el radio requerido y en consecuencia se necesita menor subenfriamiento para lograr el tamaño crítico. A la nucleación en la superficie de las impurezas se le llama nucleación heterogénea y suele aprovecharse agregando al líquido un agente extraño, llamado agente nucleante.

Todas las aleaciones de aluminio de uso ingenieril nuclean heterogéneamente durante la solidificación.

### 3.3.3 Consolidación de la solidificación<sup>48</sup>

Después de la etapa de nucleación, los núcleos ya estabilizados empiezan a crecer, este proceso de crecimiento se genera localmente.

Este crecimiento de los núcleos no es isótropo<sup>49</sup>, sino direccional. Los metales crecen, preferentemente, según determinadas orientaciones. Los núcleos al crecer dan origen a ramificaciones que reciben el nombre de dendritas (formas arborescentes). Finalmente, entre más crecen las dendritas menos líquido queda sin solidificar, por lo que la separación y cantidad de líquido entre brazos de las dendritas es menor por estar unas más cercas de las otras. El área en el cual se unen los cristales se conoce como frontera o límite de grano. Generalmente hay más impurezas en el último líquido en solidificar, ya que se van concentrando en éste, hasta alcanzar el porcentaje que le permita pasar al estado sólido y como lo último en solidificar son los límites de grano, es en éstos donde hay más impurezas.

El crecimiento cesa y las fracciones de las fases tienden a ser las previstas en el diagrama de equilibrio de una aleación polifásica. Se observa también que los precipitados gruesos continúan creciendo a expensas de los pequeños, que terminan por ser absorbidos y desaparecen. A este fenómeno se le conoce como coalescencia, el cual, desde el punto de vista metalúrgico, presenta una considerable importancia práctica, ya que éste modifica el estado final de las fases polifásicas.

## 3.4 Microestructura<sup>50</sup>

La microestructura o estructura granular, es el conjunto de granos cristalinos resultado del ordenamiento de los átomos durante la solidificación. Como consecuencia de las diversas

<sup>47</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [33] y [35].

<sup>48</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [34] y [35].

<sup>49</sup> Características de los cuerpos cuyas propiedades físicas no dependen de la dirección.

<sup>50</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [35] y [38].

afinidades metalúrgicas entre los componentes de una aleación, los átomos se enlazan formando diferentes fases en el espacio, éstas aparecen constituyendo los granos cristalinos.

La caracterización microestructural de una aleación, exige la determinación de los parámetros, éstos son: identificación de fases, tamaño de grano, forma de grano, etc.

Las fases, son un conjunto de zonas física y químicamente homogéneas en todos sus puntos, y físicamente separadas de otras fases por medio de intercaras<sup>51</sup>, para precisar mejor el concepto de fase se tiene que:

- Una fase puede presentarse como un solo bloque o estar constituida por varias partes.
- Una fase puede estar integrada por varios componentes, bien porque hay solubilidad entre ellos, o bien porque forman un compuesto químico.
- Un componente puede formar varias fases, por ejemplo puede estar en estado líquido, o sólido, o vapor, o presentar distintos estados alotrópicos en estado sólido, etc.
- La eutéctica no puede considerarse como una sola fase; ya que está formada por cristales física y químicamente diferenciables entre sí. Así una eutéctica binaria (formada por 2 metales A y B) tiene dos fases: el metal A y el metal B. Sin embargo, la eutéctica tiene una morfología diferente a las otras fases de la aleación, por lo que se le considera como una fase del material, y además, en servicio, la mezcla eutéctica, responde en conjunto como si fuese una sola fase. Las propiedades son de mezcla eutéctica.

La microestructura posee una determinada estabilidad a permanecer en un estado y no cambiarán a otro al menos que exista una fuerza que las haga cambiar. Esta fuerza pudiera ser proporcionada por cualquier forma de energía, de modo que las fases puedan ser modificadas por métodos mecánicos, químicos o térmicos.

Las microestructuras son responsables de muchas de las propiedades de los materiales como resistencia a la tensión, a la fatiga, conductividad eléctrica, acabado, etc. Es importante poder controlarlas para tener un material capaz de proporcionar las características deseadas.

Para muchas aplicaciones; especialmente para resistencia, buen alargamiento y, sobre todo, para tenacidad; interesa que el tamaño del grano de solidificación sea el menor posible.

La microestructura que resulta de la solidificación puede ser la final, es decir, la que va a entrar en servicio. En este caso se afecta directamente a las propiedades mecánicas del producto. En otros casos, se puede utilizar, después de la solidificación, tratamiento térmico y otros procesos que modifican aún más la microestructura de solidificación. Sin embargo,

---

<sup>51</sup> Intercara: Zonas delimitadas por superficies, al otro lado de las cuales las propiedades no son las de la fase

el resultado de este procesamiento, siempre estará afectado por la microestructura de solidificación.

### 3.5 Diagrama de equilibrio.<sup>52</sup>

Entre los materiales que componen una aleación sólida puede existir o no alguna afinidad. Las afinidades pueden ser de varios tipos: afinidad intermetálica, afinidad de disolución sólida, etc., siendo posible la simultaneidad de más de uno de los tipos de afinidad.

Hay afinidad de disolución sólida, cuando dos metales en estado sólido son solubles entre sí, es decir cuando en la red cristalina de uno de ellos (disolvente) se pueden sustituir algunos de sus átomos, al azar, por átomos de otro metal (soluciones sólidas de sustitución); o bien insertarse algunos átomos extraños en los espacios interatómicos del metal disolvente (soluciones sólidas de inserción).

Hay un caso muy poco frecuente, donde dos metales A y B forman mezcla homogénea en estado líquido, pero que no presentan afinidad de solución sólida y son totalmente insolubles entre sí en estado sólido. En este caso ningún átomo de B será retenido en la red de A.

En otras ocasiones puede existir afinidad entre dos metales, por ejemplo afinidad química, en cuyo caso tienden a dar un compuesto intermetálico<sup>53</sup>  $A_xB_y$ , o bien puede existir otro tipo de afinidad que recibe el nombre de eutéctica.

Cuando entre dos elementos existe afinidad química (fuerza de atracción) para formar un compuesto sólido  $A_xB_y$ , la red cristalina del compuesto C suele ser distinta de la red de A y de la red de B, y más estable que éstas.

Si los metales A y B tienen afinidad eutéctica, tienden a formar un compuesto líquido de composición  $A_xB_y$ . La afinidad eutéctica induce a mantener en estado líquido los átomos de A y B. La solidificación sólo se iniciará cuando iguallen fuerzas de atracción y de repulsión.

Resumiendo lo dicho anteriormente, para que dos metales A y B puedan formar solución sólida total en estado sólido es condición necesaria, aunque no suficiente, que tengan similar radio atómico, igual estructura cristalina, similar electronegatividad y similar valencia. No es frecuente que dos metales reúnan todas las condiciones necesarias para formar solución sólida total. El aluminio no forma solución sólida ilimitada o total.

El diagrama de equilibrio es un mapa que describe las fases presentes en un material en función de variables termodinámicas. Se suponen condiciones de enfriamiento y calentamiento muy lentas.

<sup>52</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando la referencia [37].

<sup>53</sup> Compuestos que además de enlace metálico, presentan también otros tipos de enlaces; para distinguirlos de los compuestos químicos que sólo tienen enlaces no metálicos

Para especificar por completo el estado de un sistema en equilibrio, es necesario especificar tres variables independientes; temperatura, presión y composición. Si se supone que la presión permanece constante, el diagrama de equilibrio indicará los cambios estructurales debidos a la variación de temperatura y composición.

La información que se puede obtener en un diagrama de fases es:

- Mostrar qué fases están presentes a diferentes composiciones y temperaturas en condiciones de enfriamiento lento ( equilibrio)
- Indicar la solubilidad en estado sólido y en equilibrio de un elemento (o bien de un compuesto) en otro.
- Indicar la temperatura a la cual una aleación que se ha enfriado en condiciones de equilibrio comienza a solidificar así como el rango de temperatura en el que ocurre la solidificación.
- Indicar la temperatura a la cual empiezan a fundirse las diferentes fases.

### 3.6 Piezas para moldeo de Aluminio<sup>54</sup>

El principal aspecto a considerar en una pieza vaciada es el de las condiciones a las que se va a someter durante su uso. Por ejemplo las cargas mecánicas de tensión, compresión, fatiga mecánica y térmica. Otras consideraciones que hay que tener en cuenta, se mencionan a continuación.

- Consideraciones del líquido fundido: fluidez, resistencia al agrietamiento en caliente, intervalo de solidificación.
- Propiedades mecánicas de la aleación: resistencia, ductilidad, respuesta al tratamiento térmico, dureza.
- Requerimientos de servicio: resistencia a la corrosión, tratabilidad en la superficie, estabilidad dimensional, estabilidad térmica, etc.
- Aspectos económicos: maquinabilidad, soldabilidad, tratamientos térmicos necesarios, costos de lingote y vaciado.

Las aleaciones de aluminio para moldeo más importantes son las familias Al-Si y Al-Cu.

Las aleaciones vaciadas de aluminio pueden clasificarse, según su uso, en las siguientes categorías: aleaciones para la producción de rotores, aleaciones para pistones y partes sometidas a temperaturas elevadas, aleaciones de usos y propósitos generales, aleaciones vaciadas en molde, aleaciones Al-Mg, aleaciones Al-Si, duraluminio, aleaciones Al-Zn-Mg y aleaciones de rodamientos.

Desde el punto de vista económico, las aleaciones vaciadas más importantes son las de la categoría de usos y propósitos generales; principalmente por su mejor característica de vaciado. En las aleaciones de esta categoría se tienen las del tipo silicio-cobre, entre éstas la

---

<sup>54</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [31] y [34].

213.0, 308.0, 319.0, en las cuales el silicio proporciona buenas características de vaciado; el cobre da una resistencia moderada con una mejora en la maquinabilidad, con una reducción en la ductilidad y una baja en la resistencia a la corrosión. El contenido de silicio se maneja entre el 3 y 10.5% mientras que el cobre está entre el 2 y 4.5%. El tratamiento de envejecimiento natural (T5) puede aplicarse para mejorar la maquinabilidad y dureza.

### 3.7 Aleaciones vaciadas aluminio-silicio-cobre<sup>55</sup>

Este tipo de aleaciones abarcan más del 80% del total de piezas para fundición de aluminio. Los efectos más resaltantes del silicio en las aleaciones de aluminio son: reducción del cambio volumétrico durante la solidificación y aumento en la fluidez del metal líquido.

Las aleaciones de colada de aluminio más comunes y sus composiciones químicas, se muestran en el Anexo 3.

La diferencia entre la densidad del aluminio y la del silicio es bastante pequeña ( $\rho_{Al}=2.70$ ,  $\rho_{Si}=2.33$  g/cm<sup>3</sup>). El silicio es por lo tanto uno de los pocos elementos que pueden ser adicionados al aluminio sin que exista un cambio esencial en la densidad de éste último.

Las propiedades mecánicas de estas aleaciones dependen notablemente del tamaño, forma y distribución de las partículas de silicio presentes en la microestructura que, en su momento, puede ser manipulada por la apropiada selección de las condiciones de solidificación o por la adición de elementos de aleación adecuados.

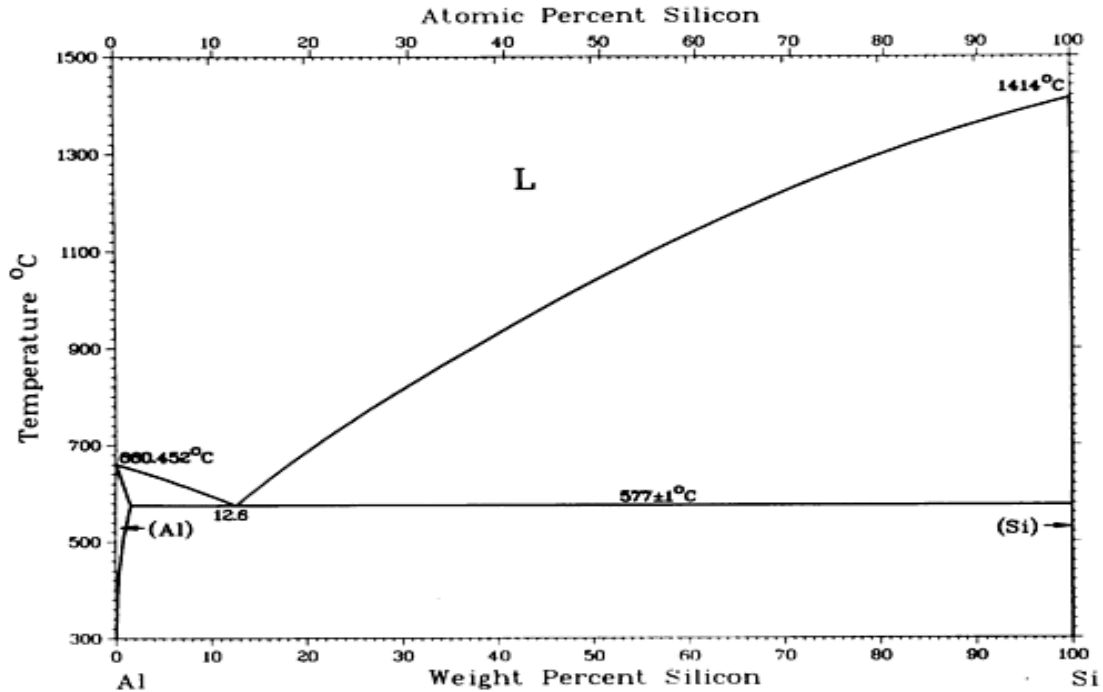
El diagrama de fase del sistema binario aluminio-silicio está representado en la figura 3.4. Entre las más interesantes y más importantes aleaciones binarias en este sistema, están aquellas de composición eutéctica (punto eutéctico a 12.6% a 577°C) o cerca del eutéctico, debido a su excelente colabilidad.

En la solución sólida “ $\alpha$ ”, a la temperatura de 577°C se disuelve, el 1.65% de silicio. A 300°C se disuelve aún, aproximadamente, el 0.07% de Si. La solidificación del silicio eutéctico puede ser modificado por pequeñas adiciones de sodio o estroncio. En este caso se produce un subenfriamiento, junto con el desplazamiento de la concentración del eutéctico, dependiente de la velocidad de enfriamiento.

---

<sup>55</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [33], [35], [38] y [40].

Figura 3.4. Diagrama de fase del sistema binario aluminio-silicio.



Fuente: **Metal Handbook Volume 03: Alloy Phase Diagrams.**

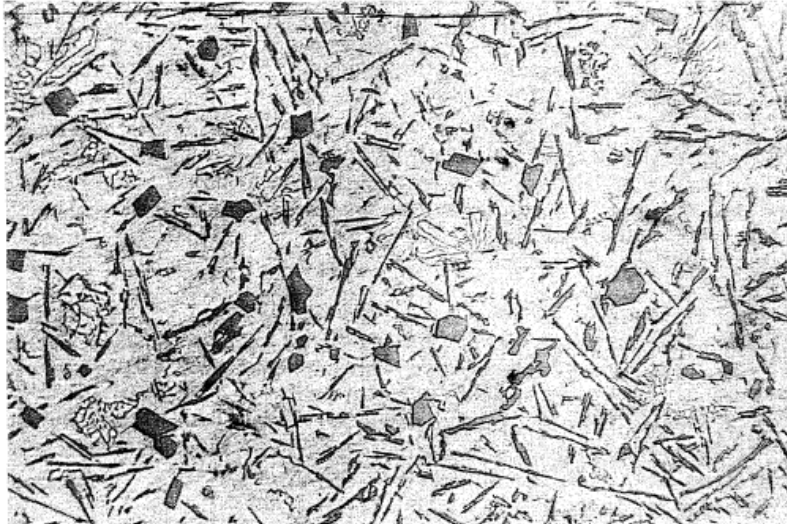
Una parte importante de las aleaciones de aluminio utilizadas para obtener piezas en la industria de la fundición, contiene silicio en un porcentaje del 5 al 12%.

Para una aleación Al-Si con contenido de silicio 12.6% (composición eutéctica), la cinética de solidificación del Si es más rápida que la del Al, debido a que en toda eutéctica solidifica en primer lugar el constituyente de punto de fusión más alto (Silicio en la eutéctica Al-Si).

Esto trae como consecuencia una rápida nucleación del silicio que va desarrollándose libremente, en forma de cuboides o de agujas. La estructura resultante puede observar en la figura 3.5.



Figura 3.5. **Eutética Al-Si Sin Modificar.**



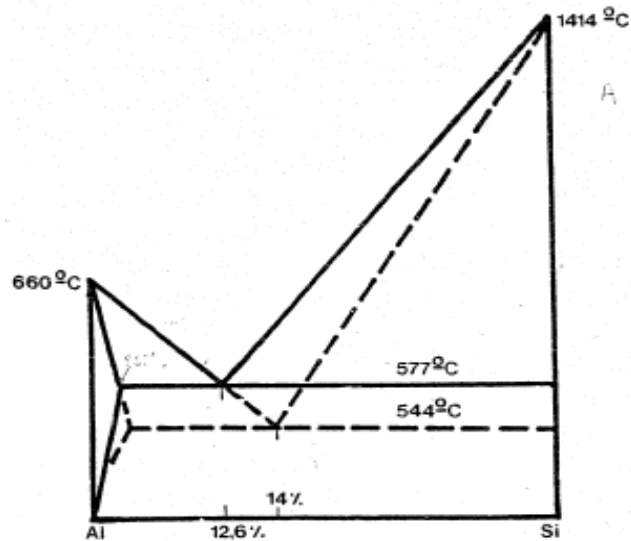
Fuente: [35]

El efecto entalla que los cuboides, y especialmente las agujas, producen en la matriz explica la baja tenacidad de la aleación de composición eutéctica.

En 1920 Aladar Pacz puso a prueba un sistema de fusión, adicionando Na antes de colar, que permite la obtención de una estructura de la eutéctica en forma de pequeñas partículas de Si finamente dispersas en la matriz de aluminio. El sodio, al producir subenfriamiento y desplazar la composición de la eutéctica hasta 14% Si y bajar la temperatura eutéctica de 577°C a 544°C (ver figura 3.6), convierte a la aleación de 12.6 % de Si en ligeramente hipoeutéctica en Al, y tiende a igualar las cinéticas de solidificación de los constituyentes de la eutéctica, es decir tiende a igualar los tiempos necesarios para la solidificación del Al y Si.

Con ello las agujas y cuboides de silicio, al ser prontamente envueltas por la cantidad correspondiente de aluminio, alcanzan un menor desarrollo (son más finas) y producen menor efecto entalla (ver figura 3.7). La tenacidad al impacto es mayor, que en el no modificado.

Figura 3.6. Subenfriamiento producido por el Na en la eutéctica Al-Si.



Fuente: [35]

Figura 3.7. Eutéctica Al-Si Modificada.



Fuente: [35]

Las investigaciones de elementos alternativos para modificar las aleaciones de aluminio-silicio revelan que puede utilizarse el estroncio en lugar del sodio, pues el sodio es un metal muy reactivo, por lo que se requiere de un control muy estricto del nivel de adición. El estroncio no requiere un control del nivel de adición, y se logra, además, un rendimiento superior como agente modificador.

El contenido de silicio de la aleación y la velocidad de solidificación de la pieza pueden influir en la adición de estroncio necesaria. Por ejemplo, la velocidad de solidificación en las piezas de molde permanente generalmente, es superior a la de las piezas coladas en

molde de arena, por lo cual, normalmente, se requiere menos estroncio para una modificación satisfactoria de una pieza en coquilla que para un pieza colada en molde de arena.

La modificación con estroncio es una práctica aceptada en las fundiciones de piezas en molde de arena, molde permanente o coquilla a gravedad. El proceso es útil especialmente para las aleaciones de piezas de aluminio-silicio empleadas en la fabricación de pistones de automóvil, cabezas de automotores, monoblocks, cilindros de freno, piezas de avión y piezas de pared delgada y otras aplicaciones que exigen buena resistencia mecánica y ductilidad.

Las aleaciones Al-Si son muy dúctiles y resistentes al choque; tienen un bajo coeficiente de dilatación y una elevada conductividad calorífica y eléctrica, pero son difíciles de mecanizar por la naturaleza abrasiva del silicio.

### **3.8 Microestructura en aleaciones vaciadas aluminio-silicio-cobre<sup>56</sup>**

El grupo de estas aleaciones abarca un amplio campo de composiciones, que va aproximadamente desde 4% a 10% de silicio y desde el 2% al 4% de cobre. El silicio imparte elevada fluidez y el cobre aumenta la resistencia mecánica. Aleaciones con más del 3% al 4% de cobre son tratables térmicamente, pero usualmente el tratamiento térmico es usado sólo con estas aleaciones que también tienen magnesio, el cual realza la respuesta al tratamiento térmico. Estas aleaciones son muy utilizadas en la industria automotriz por su alta relación resistencia-peso.

Como en cualquier otro material utilizado en este tipo de procesos, la microestructura de la aleación depende tanto de la composición química como del proceso de fundición y vaciado<sup>38</sup>.

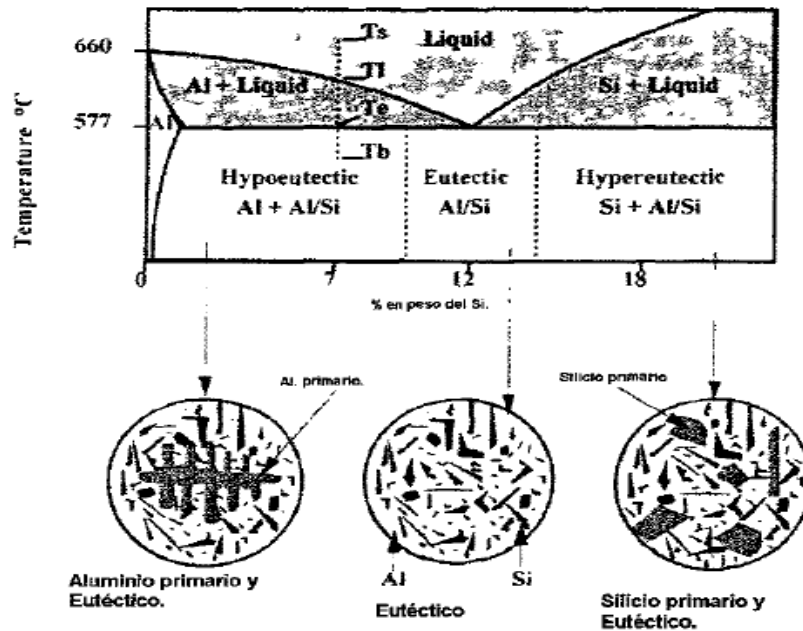
Cuando solidifica una aleación de aluminio generalmente con contenido menor al 12% de silicio (hipoeutéctica), la primera fase a formar es aluminio, ver figura 3.8.

Durante la solidificación de la aleación ocurre el fenómeno de crecimiento dendrítico, solidificación de aluminio primario, la reacción eutéctica, la solidificación de fases ricas en Fe y otras fases de Cu y Mg presentes.<sup>38</sup>

---

<sup>56</sup> Este apartado se ha elaborado utilizando las referencias [34], [39], [41], [42].

Figura 3.8. Diagrama de fases aluminio-silicio



Fuente: **Página web [39]**.

Los resultados de investigaciones metalográficas, muestran que las aleaciones vaciadas de aluminio son caracterizadas por una estructura dendrítica de solución sólida  $\alpha$ , como matriz de la aleación, así como caracterizada por la formación de grandes placas irregulares de la fase Si- $\beta$  presentes en la matriz de una manera desordenada, granos eutécticos ( $\alpha+\beta$ ) con una morfología que depende de la concentración de masa de silicio y cobre<sup>9</sup>.

En las aleaciones de aluminio, el cobre se encuentra parcialmente soluble en la solución sólida  $\alpha$  o formando intermetálicos tales como  $Al_2Cu$ , el cual solidifica en dos formas después de la reacción eutéctica Al-Si; una como masa o bloques y la otra como un eutéctico fino. El principal propósito para añadir cobre a las aleaciones de aluminio es mejorar su resistencia. Cuanto mayor sea el contenido de cobre, mayor es el nivel de dureza que se conseguirá. Cuando se aumenta el contenido de cobre, mayor a más del 6% la colada parece mejorar, pero el peso específico de la aleación y formación de porosidad aumenta considerablemente. La resistencia y la ductilidad de las aleaciones dependen de si el cobre está presente en la solución sólida en partículas esferoides uniformemente distribuidas, o como una red continua en los límites de grano.

También, la microestructura de las aleaciones Al-Si-Cu se caracteriza por la ocurrencia de precipitaciones de fase que tienen el hierro presente. El hierro es considerado uno de los elementos de impureza más perjudiciales presentes en el aluminio.

La solubilidad del hierro es muy baja en las aleaciones de aluminio, con el resultado que más hierro presente forma compuestos intermetálicos. En un sistema binario Al-Fe, la solución sólida de equilibrio del hierro en el aluminio es 0.03%-0.05% en peso a la

temperatura eutéctica  $655^{\circ}\text{C}$ . Debido a la solidificación de no equilibrio, no es raro encontrar varias fases intermetálicas frágiles y perjudiciales, como  $\text{FeAl}_6$ ,  $\text{FeSiAl}_{13}$ ,  $\text{Fe}_2\text{SiAl}_8$ ,  $\text{Al}_5\text{FeSi}$  y  $\text{FeSi}_2\text{Al}_4$  que coexisten entre sí y con el silicio.

En cuanto al efecto del contenido de hierro en la formación de compuestos, muchas investigaciones han informado que un contenido de hierro entre  $0.05\% < \text{Fe} < 0.7\%$ , se cree que forman fases en forma de agujas pequeñas, después de la eutéctica de silicio. Para un contenido mayor de  $0.7\%$  más agujas de la fase  $\text{Al}_5\text{FeSi}$  parecen precipitar antes de la eutéctica de silicio. Estas fases que precipitan a temperaturas altas tienden a crecer durante el proceso de solidificación que resulta en forma de agujas más gruesas.

Si están presentes el magnesio, cobre y hierro, promueven la formación de diferentes intermetálicos coexistentes. Con la presencia del magnesio la fase  $\text{Al}_8\text{FeMg}_3\text{Si}_6$  se puede formar en forma de escritura china (cuando es eutéctica) o en forma de glóbulos (cuando es primaria).

La morfología y el tamaño de las fases, que contienen hierro, dependen de la composición de la aleación, del tratamiento de fusión, de las condiciones de colada y velocidad de enfriamiento, y pueden aparecer como pequeñas o grandes agujas o en forma de escritura china, cuando el Mn o Mg están presentes en la aleación, aparecen figuras en forma de estrella o partículas poliédricas.

Otros estudios realizados indican que el Mn juega un rol importante en la reducción de la cantidad de porosidad en las aleaciones con contenido de hierro (Fe supercrítico  $> 1\%$ ). Para contenidos de hierro mayores a  $1\%$  (Fe supercrítico) sin adición de Mn, la concentración de este elemento en el líquido es lo suficientemente alta, para permitir que la nucleación de fases ricas en hierro se produzcan antes que la reacción eutéctica aluminio-silicio, lo que provoca intermetálicos de hierro más grandes y gruesos. La adición de la pequeña cantidad de manganeso en relación con hierro (Mn:Fe=1:6) parece no influir en el grado de porosidad. Una relación Mn:Fe=1:2 forma fases más compactas y previene la nucleación antes de la eutéctica Al-Si, que conduce a una reducción en la porosidad.

La fluidez de las aleaciones de Al-Si se determina por muchos factores tales como la gama de temperaturas de solidificación, la viscosidad, las tensiones superficiales de la masa fundida y, por supuesto, la cantidad de inclusiones. Un aumento en el contenido de hierro, aumentará la cantidad de fases insolubles y por lo tanto reduce la fluidez de la aleación.

## Capítulo 4

### Preparación Metalográfica del Aluminio: Parte Experimental

#### 4.1 Preparación metalográfica<sup>57</sup>.

Como sabemos, el análisis metalográfico es el estudio de las características microestructurales o de constitución de un metal o una aleación para relacionar ésta con las propiedades físicas y mecánicas. Sin embargo, la experiencia demuestra que poco o nada se puede obtener del examen microscópico, si antes no se ha preparado correctamente la probeta para obtener una superficie satisfactoria.

La preparación metalográfica requiere una secuencia específica de operaciones que son el corte, montaje, esmerilado o desbaste, pulido, limpieza y ataque. Cada uno de estos pasos se puede realizar de diferentes maneras y puede variar en función de las propiedades del material específico.

Una preparación defectuosa puede arrancar todas las inclusiones interesantes, destruir los bordes de grano y, en resumen, originar una estructura en la superficie, que no guarda relación con la verdaderamente representativa y característica del metal, y en consecuencia dar interpretaciones y conclusiones erróneas.

La preparación de la probeta consiste, en general, en obtener primero una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de papeles de carburo de silicio de finura de grano creciente, terminando con un pulido fino y final sobre discos provistos de paños, en los cuales se deposita un abrasivo. Esto procediendo desde un desbaste grueso, uno intermedio y uno fino.

El final de la operación es la obtención de una superficie especular que es la requerida para, posteriormente, efectuar el ataque químico y observar adecuadamente la microestructura.

---

<sup>57</sup> Este apartado ha sido realizado utilizando las referencias [11] y [12].

Uno de los factores más importantes que hay que tener en cuenta sobre la técnica de preparación metalográfica es el cuidado con que se le maneja a la probeta en todas las etapas de operación. Igual importancia tiene el trabajar con limpieza, porque una partícula del esmeril o de una materia extraña puede inutilizar la probeta.

En este trabajo se han analizado muestras correspondientes a dos piezas obtenidas por moldeo. La primera corresponde a una paleta de ventilador y la segunda a un pistón de motor de combustión interna.

La composición química exacta de estas aleaciones, se determinó mediante la técnica de espectroscopia de absorción atómica, y los resultados, expresados en tanto por ciento en peso, son los siguientes.

Tabla 4.1. **Muestra n°1 – Paleta de ventilador.**

Elemento	Composición Química
Aluminio	Resto
Silicio	5,19
Hierro	0,80
Cobre	3,11
Magnesio	0,16
Cromo	0,07
Manganeso	0,38
Estaño	<0,30
Zinc	0,79
Níquel	0,11

Tabla 4.2. **Muestra n°2 – Pistón de un motor de combustión interna.**

Elemento	Composición Química
Aluminio	Resto
Silicio	11.48
Cobre	3.9
Magnesio	0.61
Hierro	0.53
Manganeso	0.06

La composición de cada aleación, nos permite conocer la designación que le corresponde a cada una de las muestras, de acuerdo, a la “Aluminum Association”. Para la muestra

obtenida de la paleta de ventilador la designación es 319.1<sup>58</sup>, y para la obtenida a partir de un pistón de un motor de combustión interna la designación es 384.2<sup>59</sup>.

#### **4.2 Dificultades que se presentan durante la preparación metalográfica del aluminio y sus aleaciones<sup>60</sup>.**

Las aleaciones de aluminio abarcan un amplio rango de composición química y, por lo tanto, un amplio rango de durezas. Como consecuencia, la técnica metalográfica requerida para la preparación metalográfica varía considerablemente. Generalmente, las aleaciones más suaves son más difíciles de preparar mediante un pulido mecánico, por las siguientes razones: 1) porque la deformación causada por el corte y el desbaste se extiende a una mayor profundidad, 2) es más probable la incrustación de partículas abrasivas en el metal durante el pulido, y 3) la separación entre la matriz y las partículas de segunda fase, las cuales son considerablemente más duras que la matriz, se da más fácilmente durante el pulido.

Las aleaciones más duras, aunque más fáciles de preparar, presentan una mayor variedad de fases y complejidad en la estructura. Sin embargo, existen métodos por lo que las dificultades de la preparación y examinación de ambas aleaciones, blandas y duras, pueden ser evitados. Muchos métodos son de carácter general y se aplican para todos los metales, pero algunos han sido desarrollados específicamente para aleaciones de aluminio.

Es importante tener en cuenta que muchos de los procesos de recuperación y precipitación en las aleaciones de aluminio se pueden producir a temperaturas relativamente bajas, como 150 a 250 °C, las cuales son fácilmente producidas en operaciones tales como corte y pulido. Estas operaciones rara vez producen cambios visibles al microscopio óptico, aunque pueden hacerlo en casos extremos. Sin embargo, pueden producir cambios visibles en la estructura con un microscopio electrónico. Se debe tener un cuidado especial para no sobrecalentar el metal durante la preparación de la muestra, especialmente cuando se usan métodos o materiales no convencionales.

#### **4.3 Equipos, materiales e insumos utilizados.**

- Equipo de moldeo a presión (Embutidora)
- Microscopio metalográfico
- Pulidoras metalográficas ( 1 $\mu$ , 3 $\mu$ )
- Secadora
- Calentador de agua.
- Papeles abrasivos de carburo de silicio (# 120, 180, 320, 400, 600).
- Paños para pulido.
- Algodón

---

<sup>58</sup> Ver designación en Anexo 3.

<sup>59</sup> Ver designación en Anexo 3.

<sup>60</sup> Este apartado ha sido realizado utilizando la referencia [4]



- Abrasivos: Pasta de diamante de  $1\mu$  y de  $3\mu$ , óxido de magnesio.
- Bakelita (resina termoendurecible)
- Termómetro ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- Agua destilada o desionizada
- Ácidos: Acido fluorhídrico, Acido clorhídrico,
- Alcohol

#### 4.4 Seccionamiento<sup>61</sup>

Es el primer paso de la preparación metalográfica. La selección y separación de la muestra que va ser examinada al microscopio es de gran importancia, ya que es necesario tener una probeta representativa del material a examinar, y muchas veces no se le suele dar la importancia que merece.

La muestra seleccionada debe ser característica del metal en estudio y servir para el fin al que éste se dirige; por ejemplo, si una pieza se ha roto durante el servicio, el objetivo del estudio metalográfico es determinar las causas de la rotura, por lo tanto, la probeta que debe de seleccionarse es de aquella región de la fractura, ya que puede dar el máximo de información.

La probeta, “paleta de ventilador” o muestra n°1 se obtuvo de la zona indicada en la figura 4.1. En nuestro caso, podemos ver en la figura 4.1 la paleta de ventilador fracturada, por lo que la muestra seleccionada tiene que ser extraída de la zona de falla.

Figura 4.1. **Obtención de la muestra n°1.**



La muestra n°2, “Pistón de un motor de combustión interna”, se obtiene de la parte indicada en la figura 4.2.

<sup>61</sup> Este apartado ha sido realizado utilizando la referencia [12].

Figura 4.2. Obtención de la muestra n°2.



El daño que se le puede hacer a la muestra durante el seccionamiento depende del tipo de material que se está cortando, de la naturaleza del dispositivo de corte que se está usando y de la cantidad de refrigerante utilizado. En algunas muestras, el daño en la superficie es insignificante y puede ser eliminado durante el posterior esmerilado y pulido.

Las aleaciones de aluminio pueden ser seccionadas por cualquier método de corte estándar (sierra mecánica o sierra manual), sin embargo, el corte no debe alterar la estructura o la configuración de la muestra en el plano que se examinará. Entonces, como muchas aleaciones de aluminio son suaves, el aserrado debe hacerse a una distancia del plano a pulir.

El enfriamiento, muy importante, se logra echando sobre la muestra una corriente ininterrumpida de agua o líquido refrigerante, precisamente en la región que se corta. Si no se elige bien la herramienta de corte y no se enfría suficientemente la probeta durante el corte, se altera radicalmente la estructura original, por lo menos en la superficie obtenida por el corte, como consecuencia del calor desarrollado por la fricción.

Hay que tener una muestra de tamaño conveniente, ya que las probetas con superficie muy grande pueden requerir tiempos de pulido excesivamente largos, mientras que las demasiado pequeñas tienden a redondearse durante el desbaste, resultando superficies preparadas, curvas con los bordes estropeados. Las muestras pequeñas deben montarse.

#### 4.5 Montaje<sup>62</sup>

Es necesario el montaje de las muestras en un dispositivo sujetador cuando se preparan muestras metalográficas irregulares, pequeñas, muy suaves, porosas o frágiles, y para un fácil manejo en las operaciones de desbaste, pulido y ataque.

El proceso de montaje no debe dañar físicamente la muestra, causando ya sea distorsión o cambios estructurales que serían detectables en el examen microscópico posterior. Del mismo modo, hay que tener en cuenta la selección del material para el embutido ya que el calor y la presión necesaria para algunos materiales de montaje, pueden alterar la microestructura. El material, debe tener una buena adhesión a la muestra, suficiente resistencia mecánica (dureza) y resistencia química a los agentes de ataque o disolventes que se utilizan durante la preparación.

Actualmente, se utiliza materiales sintéticos como la bakelita (resina termoendurecible fenólica) para montar probetas metalográficas; la manipulación es sencilla; pero como es preciso aplicar calor y presión simultáneamente, se requiere una prensa montadora especial o embutidora.

La temperatura máxima requerida para el endurecimiento de la bakelita es de 135 a 150 °C, juntamente con una presión de 2500 a 3500 PSI.

El moldeo a presión se recomienda para el montaje de muestras que no son sensibles a temperaturas de 150°C y a presiones de 295 kg/cm<sup>2</sup> (4200 PSI). Materiales delicados, sensibles a estas condiciones deben moldearse con resinas a temperatura ambiente.

Es deseable que no se formen fisuras en la interfase muestra-plástico; ya que esto se convierte en un problema cuando los líquidos (agua, reactivos), se quedan en las fisuras causando manchas en la superficie preparada.

Antes de embutir, el primer paso es limpiar las muestras para sacar la suciedad sólida, grasa u otros desechos, a esto se le llama limpieza física. También se hace limpieza química que implica sacar cualquier contaminante. En el trabajo metalográfico la limpieza física suele ser suficiente y siempre es necesaria.

La muestra debe ser por lo menos 1 cm (0,4 pulgadas) más pequeño que el diámetro del cilindro de montaje en cualquier dimensión lateral. Las esquinas deben ser eliminadas de la muestra, si es posible.

El montaje se realiza por calentamiento rápido de la muestra y el material de montaje en un cilindro a presión. La muestra se coloca boca abajo sobre el pistón inferior del cilindro. El material de fijación se vierte sobre la muestra (la cantidad de resina va a depender del tamaño de la muestra, la muestra tienes que estar completamente cubierta), y el pistón superior se coloca dentro del cilindro, seguidamente se le aplica calor y presión al cilindro. La presión se debe aplicar inmediatamente después de empezar a calentar el molde.

---

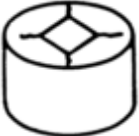



<sup>62</sup> Este apartado ha sido realizado utilizando las referencias [4], [10], [11], [12]




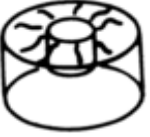
Hay que controlar la presión, ya que tiene que mantenerse en una presión de moldeo durante un periodo prolongado. Durante el proceso se va a observar que la presión baja cada cierto tiempo, por lo que hay que volver a aumentarla hasta el punto de moldeo.

El tiempo que dura el proceso de calentamiento, o cuando ya se debe empezar el enfriamiento, es cuando la presión ya no disminuye, es decir cuando se mantiene en la presión de moldeo. Cuando se llega a este punto, que generalmente son 20 minutos, se quita la fuente de calor y se pone el dispositivo de enfriamiento. En esta parte del proceso el enfriamiento es constante, ya que el dispositivo al ser de aluminio se le transfiere rápido el calor.

Varios tipos de defectos pueden ocurrir con el moldeo por compresión para cualquiera de las resinas termoestables o resinas termoplásticas. Algunos defectos de montaje comunes y sus causas se describen en el siguiente cuadro, (ver tabla 4.3).

Tabla 4.3. **Problemas típicos de los materiales de montaje por compresión.**

<b>PROBLEMA</b>	<b>CAUSA</b>	<b>SOLUCIÓN</b>
<b><u>RESINA TERMOESTABLE</u></b>		
 Rajaduras radiales	Demasiado grande la sección para el área del molde; picos afilados.	Incrementar el tamaño del molde; reducir el tamaño de la muestra.
 Contracción del borde	Excesiva contracción del plástico lejos del borde de la muestra. Hace que la muestra quede por encima de la superficie del plástico.	Disminuir la temperatura de moldeo; molde ligeramente frío antes de la expulsión.
 Rajaduras Circunferenciales	Humedad absorbida; gases atrapados durante el moldeo.	Pre calentamiento de polvo o pre-moldeo;
 Estallar	Periodo de curado demasiado corto; insuficiente presión.	Alargar periodo de curado; aplicar suficiente presión durante la transición de estado líquido a estado sólido.

 <p>Sin Fundir</p>	<p>Moldeo a presión insuficiente; tiempo insuficiente a la temperatura de curado; mayor área superficial de materiales en polvo.</p>	<p>Hacer el moldeo a presión adecuada; Aumentar el tiempo de curado, con polvos rápidamente sellar el molde y aplicar presión para eliminar el endurecimiento localizado.</p>
 <p>Resina Consolidada sólo en la Superficie.</p>	<p>Excesiva temperatura de moldeo.</p>	<p>Disminuir la temperatura del molde; un momento de liberación de presión durante el estado sólido.</p>
<p><b><u>RESINA TERMOPLÁSTICA</u></b></p>		
 <p>Bola de Algodón</p>	<p>El polvo no alcanzó la temperatura máxima; insuficiente tiempo a la temperatura máxima.</p>	<p>Aumentar el tiempo de permanencia a la temperatura máxima.</p>
 <p>Cuarteo</p>	<p>Alivio de tensiones al momento de la expulsión.</p>	<p>Permitir enfriar hasta una temperatura más baja antes de sacarlo de la montadora.</p>

Fuente: **ASM Handbook Volume 09 [4]**.

#### 4.6 Esmerilado<sup>63</sup>.

Una vez que se tiene la probeta fuera de la montadora lo que se hace es redondear los bordes de la resina que contiene a la muestra, para así evitar roturas y desgarros de papeles de lija y paños en las operaciones posteriores. También, se logra hacer plana la superficie que va a observarse.

Durante este proceso, y durante los posteriores, desbaste intermedio y final, no se debe aplicar la probeta contra el medio abrasivo con presión demasiado grande. La presión

<sup>63</sup> Este apartado ha sido realizado utilizando las referencias [12].

excesiva no sólo produce rayas muy profundas, difíciles de eliminar después, sino que también distorsiona intensamente al metal.

Cuando se han eliminado las irregularidades y la superficie es plana, se da por terminado el esmerilado. En este caso, para el esmerilado se utilizó una lija # 120, refrigerando con agua constantemente.

Este paso es necesario, cuando es una nueva probeta y recién se ha embutido. Si la probeta, ya ha sido trabajada, pero se dejó por un tiempo, y se quiere volver a utilizarla, ya no es necesario hacer este paso (lija #120), se recomienda ir a la lija #320 o en el peor de los casos a la lija #180.

#### 4.7 Desbaste<sup>64</sup>

La distorsión superficial del metal no se puede evitar al 100%, pero se puede aminorar mucho mediante técnicas adecuadas de desbaste y pulido.

En general, el desbaste se realiza en pasos sucesivos utilizando papeles abrasivos de carburo de silicio o lijas de 180, 320, 400 y 600, el tamaño de grano de partida depende del tipo de superficie de corte que se va a quitar.

Las aleaciones de aluminio no pueden ser desbastadas utilizando las mismas técnicas generales que para todos los metales. Por lo tanto, se ha desarrollado procedimientos que nos sirven como una guía para la preparación práctica de probetas.

Hay que impregnar los papeles de esmeril con un lubricante adecuado, puede ser aceites, gasolina, soluciones de parafina en querosene, jabones líquidos, glicerina, y mezclas de glicerina y agua. Estos lubricantes disminuyen la fluencia superficial de los metales blandos y evitan la modificación estructural superficial, al actuar como refrigerantes, mejorándose los resultados que se obtendrían desbastando en seco.

En este trabajo se han probado como refrigerante kerosene con agua, Kerosene con parafina y glicerina, obteniéndose mejores resultado con la glicerina, por lo que se le eligió como el refrigerante a utilizar.

Antes de impregnar la lija con glicerina, se debe asegurar la limpieza de la lija. También se le echa glicerina a la superficie de la probeta para asegurar su lubricación. Se recomienda tener una marca o guía en la probeta antes de empezar con el desbaste, para así mantener la dirección y para que todas las rayas producidas sean paralelas.

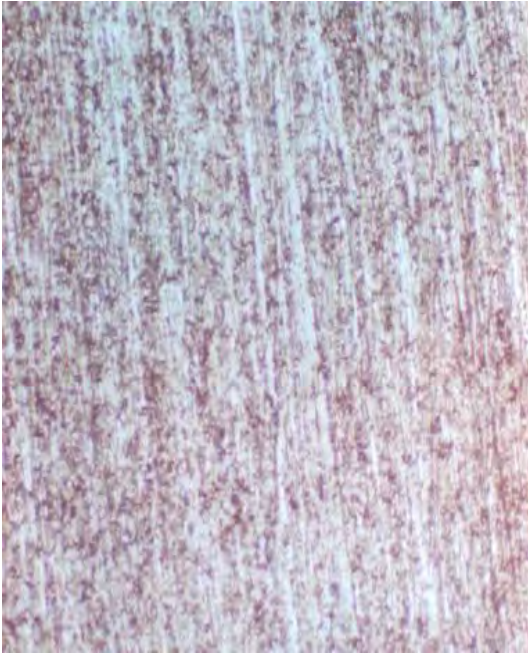
En la figura 4.3. se muestra el desbaste hecho hasta la lija #600 utilizando como refrigerantes a) Glicerina y b) Kerosene con agua. En estas fotos se puede observar que se consigue un desbaste más uniforme con la glicerina, en el desbaste con kerosene se ve en la muestra puntos negros, el desbaste no es uniforme.

---

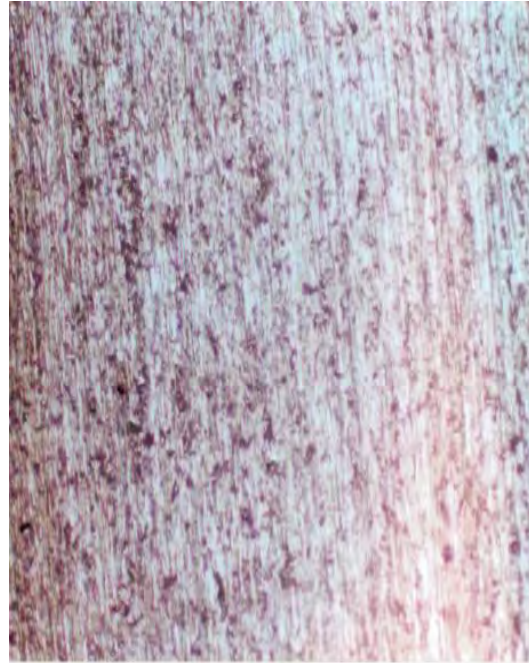
<sup>64</sup> Este apartado ha sido realizado utilizando las referencias [5], [12], [13].

Figura 4.3. **Probeta 319.1 desbastada hasta la lija #600.**

a) Glicerina



b) Kerosene con agua



La probeta se mueve verticalmente con movimientos cortos. Al momento de ejercer presión sobre la probeta hay que tener cuidado de que esa presión sea en toda la superficie del metal. Se recomienda, observar la muestra durante el desbaste para verificar que se está desbastando uniformemente, ya que la parte que está siendo lijada se va a ver opaca y si hay una parte que no está recibiendo la presión adecuada se ve más clara, entonces hay que posicionar correctamente la probeta y hacerle mayor presión al lado que no ha estado siendo lijado.

El tiempo de desbaste por lija depende del número de lija por la que se está pasando y va disminuyendo a medida que se va avanzando.

A continuación se dan los tiempos con los que se obtuvo una buena preparación, ya que se hicieron muchas pruebas donde los resultados no eran óptimos

En la lija de 180, el tiempo que se demoró fue de 4 minutos, con limpiezas intermedias cada 30 segundos. Los 2 primeros minutos, se hizo con una presión media y luego con poca presión.

Lija #320, 3 minutos, con limpiezas intermedias cada 30 segundos. Los 2 primeros minutos con presión media, el resto con poca presión.

Lija #400, 2 minutos, limpiezas intermedias cada 30 segundos. El primer minuto con presión media y luego con poca presión.

Lija #600, 1 minuto, limpiezas intermedias cada 30 segundos. Los primeros 30 segundos con presión media, el resto con poca presión.

Las limpiezas intermedias, se refiere a la limpieza de la probeta y la lija, sólo con agua, y a volver a impregnar la lija con glicerina. Esta operación de limpieza es necesaria para evitar que la superficie se raye a causa de los deterioros del papel y, es en particular indispensable y más profunda cuando se pasa de un papel a otro más fino.

El final de la operación sobre un papel está determinado por la desaparición de las rayas producidas por el desbaste en el papel anterior. Las partículas abrasivas fácilmente se integran en las aleaciones de aluminio más suave. Por lo tanto, la muestra debe lavarse minuciosamente después de cada desbaste para prevenir el arrastre de partículas abrasivas a la siguiente etapa.

Para el lavado, primero se hace abundante espuma con el detergente<sup>65</sup> (disolviendo todas las partículas de éste, para evitar que puedan rayar a la muestra), luego se le aplica esa espuma a la muestra y con las yemas de los dedos se le frota suavemente.

El secado se hace con aire caliente, se le echa alcohol a la muestra y se pone la secadora a unos 15 cm de distancia de la muestra en forma perpendicular, de lo contrario se puede manchar la muestra.

Se recomienda, antes de pasar al pulido, observar la probeta al microscopio, para verificar que las rayas están en una sola dirección y para saber qué tan gruesas han quedado las rayas después del desbaste de 600, porque si se tiene rayas profundas y gruesas se pierden el tiempo y el trabajo si se pretende eliminarlas en el pulido de 3 $\mu$ .

Se recomienda, para el aluminio y sus aleaciones, hacer el desbaste hasta las lijas #800 y #1000 que tienen un tamaño de grano equivalente a 10 $\mu$ m y 5 $\mu$ m, respectivamente. Utilizando estos papeles, se puede llegar a un desbaste fino, causando menor deformación superficial; y esto facilita los pulidos posteriores. En este trabajo no se ha hecho el desbaste por esos números de lijas, porque no se contaba con ellas.

#### **4.8 Pulido preliminar<sup>66</sup>**

El pulido de la probeta tiene por objetivo eliminar de su superficie las rayas producidas en la última operación de desbaste y conseguir una superficie sin rayas y con alto pulimiento.

El éxito del pulido y el tiempo empleado en la operación dependen en gran manera del cuidado con que se haya realizado el desbaste.

---

<sup>65</sup> El detergente, debe ser de un pH el más suave posible para limitar la corrosión del metal.

<sup>66</sup> Este apartado ha sido realizado utilizando las referencias [12]



Este pulido, es un pulido preliminar y se ha utilizado como abrasivo la pasta de diamante y se da en 2 etapas, primero con pasta de diamante de  $3\mu$  (pulido áspero), y luego con pasta de diamante de  $1\mu$ . En las 2 etapas la técnica a utilizar es la misma.

El disco de la pulidora empleado en esta operación se cubre, generalmente, con paño de lana, y se le hace girar a una velocidad baja de 150 rpm y a una velocidad alta de 200 rpm

En el pulido preliminar de  $3\mu$  se hace girar a mayor velocidad que el pulido con pasta de diamante de  $1\mu$ .

Pulido de  $3\mu$ :

- 20 segundos, con presión alta girando la probeta en sentido contrario a la rotación del disco.
- 20 segundos, con presión alta. En una sola posición sobre el disco que gira, y durante la operación se mueve continuamente desde el centro al borde del disco, y viceversa.
- 25 segundos, sin presión. Sólo sujetando la muestra sobre el disco, en una sola posición.

Para que la operación vaya bien, es necesario observar con cuidado la humedad del paño. Si se humedece demasiado, la acción pulidora del combinado paño-abrasivo se retarda mucho, y si se seca en exceso, la probeta se mancha.

Terminando el pulido con el abrasivo de  $3\mu$  se lava bien la probeta con agua corriente y detergente industrial, se la enjuaga con un poco de agua destilada para quitar las sales del agua corriente, y se le humedece con alcohol etílico para que sea más rápido su secado con aire caliente.

Antes de pasar al pulido con el abrasivo de  $1\mu$ , se recomienda observar la probeta para asegurar que no quedan rayas gruesas.

Pulido de  $1\mu$ :

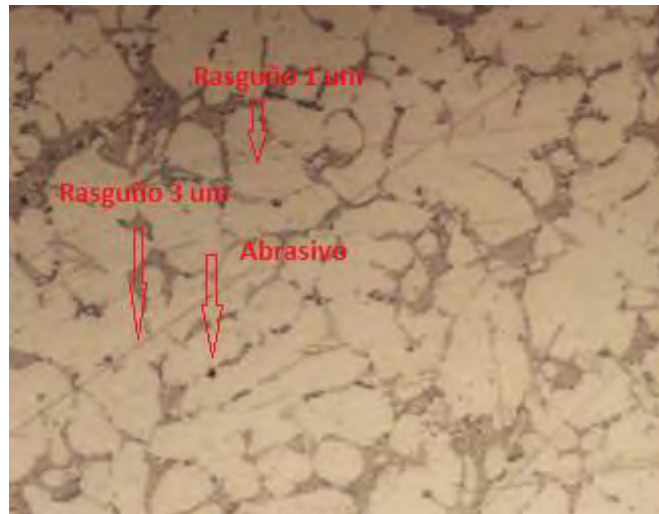
- 10 segundos, con presión alta girando la probeta en sentido contrario la rotación del disco.
- 15 segundos, con presión alta. En una sola posición sobre el disco que gira, y durante la operación se mueve continuamente desde el centro al borde del disco, y viceversa.
- 25 segundos, sin presión. Sólo sujetando la muestra sobre el disco, en una sola posición.

Las probetas bien preparadas, después del desbaste y el pulido preliminar, muestran solamente las rayas características de la pasta de diamante de  $1\mu$ , y la superficie es de brillo apagado.

El pulido mecánico, puede producir características microestructurales engañosas. Si no se retiran por completo todos los rasguños del papel metalográfico durante el pulido áspero, pueden dejar picaduras que falsamente aparecen como porosidad. Abrasivos incorporados aparecen como picaduras o una segunda fase.

La figura 4.4, muestra un mal acabado de pulido, se ven rasguños del pulido anterior de 3  $\mu\text{m}$  e incluso rasguños del último pulido por paño de 1  $\mu\text{m}$ , además de abrasivo incorporado, que aparece por un pulido muy fuerte y mala limpieza, y se pueden confundir con picaduras, porosidad, e incluso una segunda fase.

Figura 4.4. **Muestra 319.1 pulida hasta paño de 1  $\mu\text{m}$ . Aumento 200X.**



Si hay alguna duda sobre la realidad de cualquier característica de la microestructura, se recomienda un repulido completo, variando algunas de las condiciones de pulido, en una dirección que eliminaría posibles defectos.

#### 4.9 Pulido final<sup>67</sup>

Esta operación tiene por finalidad eliminar las rayas producidas, en el pulido preliminar y dar lugar, por último, a una superficie pulida uniformemente y libre de rayas.

Se ha utilizado como abrasivo óxido de magnesio, ya que es uno de los abrasivos que suele recomendarse para el pulido final de aluminio y aleaciones de aluminio.

El empleo adecuado del óxido de magnesio en el pulido final consiste en poner una pequeña cantidad (una cucharadita de te) de polvo fresco y seco sobre el paño a pulir, añadir agua destilada (libre de minerales y suspensiones y debe tener un pH neutro) en cantidad suficiente para formar una pasta, y luego trabajar esta pasta con la yema de los dedos, extendiéndola y embebiéndola en las fibras del paño.

<sup>67</sup> Este apartado ha sido realizado utilizando las referencias [4], [12]

Una gran parte de atención se le debe prestar al cuidado de los materiales utilizados en el pulido final. El óxido de magnesio se debe mantener en un recipiente hermético y seco, porque la exposición prolongada a la humedad del aire origina la formación de partículas gruesas, que luego raspan la pieza.

Durante el pulido, se tiene que mantener húmedo el paño mediante adición de agua destilada o agua desionizada neutra, ya que en presencia de agua ligeramente ácida, las fases ricas en magnesio, se ven, empañadas y picadas, y estas condiciones se ven agravadas por el exceso de agua y un tiempo muy largo de pulido final. Los paños deberían lavarse cuidadosamente y mantenerse cubiertos cuando no estén en uso.

Al empezar el pulido, los 10 primeros segundos se hace con una presión media y girando la probeta en sentido contrario al de la rotación del disco. Durante el pulido se aplica a la probeta una presión moderada y se la mueve continuamente del centro a la periferia del disco, esto por unos 40 a 50 segundos, eventualmente, y en particular al final de la operación, se vuelve a girar la probeta en sentido contrario al de la rotación del disco. Esta operación modifica continuamente la dirección del pulido y evita la formación de colas de cometa. Tales formaciones son inevitables cuando se pule en una sola dirección, porque se arrancan más o menos las inclusiones, se abrasiona el metal adyacente y aparecen picaduras y huecos dejados por dichas inclusiones. No olvidar humedecer el paño, añadiendo agua destilada lo suficiente para evitar la sequedad y la atracción de la tela a la muestra. Se prefiere una velocidad de 350 rpm o menos para el pulido final. Hacia el final del pulido, se usa abundante agua para eliminar el abrasivo restante para limpiar la muestra.

Durante el pulido, pequeñas cantidades de abrasivo se añaden de vez en cuando a la rueda para la reposición.

El paño de pulido debe limpiarse cuidadosamente después de cada uso para evitar que el compuesto se endurezca, lo que haría al paño de pulido ineficaz.

Para evitar la distorsión del metal, se debe suspender el pulido en cuanto las rayas ya no son observables a 100 aumentos, no apareciendo tampoco colas de cometa. Si persisten las rayas finas, se puede continuar el pulido final; sin embargo, es más probable que se obtengan mejores resultados repitiendo el pulido preliminar antes de terminar el pulido final.

No se tiene que descuidar el enjuague en ninguna fase previa y menos en el pulido final. La calidad del agua de enjuague determina que residuos del agua de enjuague se quedan en la superficie que se está lavando. El agua de enjuague es lo último que toca la superficie que se está lavando. El agua del caño típicamente contiene varios grados de microbios orgánicos, partículas y sales (calcio y magnesio) que causan dureza. Si se evapora el agua en la superficie puede depositar estos contaminantes, muchas veces los causantes de las manchas al secado. Es por esto, que después de lavar la muestra con agua de caño se hace un último enjuague con agua destilada<sup>68</sup> o agua desionizada<sup>69</sup>. En la figura 4.5, se muestra

---

<sup>68</sup> El agua destilada, es particularmente baja en contaminantes.

<sup>69</sup> El agua desionizada, es particularmente baja en contaminantes iónicos o inorgánicos.

una probeta pulida hasta óxido de magnesio, que no se limpió con suficiente detergente y se enjuagó con agua de caño, lo que originó manchas al momento del secado.

Figura 4.5. **Muestra de aluminio pulida hasta óxido de magnesio. Sin ataque. Aumento 1000X.**



La probeta pulida puede atacarse inmediatamente después de terminado el pulido final o se puede guardar para usarla más tarde y examinarla sin ataque. En cualquier caso, la superficie de la probeta debe protegerse de la oxidación y otros efectos perjudiciales atmosféricos.

A continuación se muestra en la figura 4.6, la microestructura de una probeta que ha seguido todos los pasos de desbaste y pulido correctamente.

Figura 4.6. **Muestra 384.2 pulida hasta óxido de magnesio. Aumento 1000X.**



#### 4.10 Ataque químico.<sup>70</sup>

La mayoría de las probetas no atacadas, dependiendo de la aleación, no revelan ningún detalle microestructural; pero a pesar de esto, es importante observarla al microscopio porque hay detalles que ya son visibles tales como los defectos superficiales y las inclusiones no metálicas. En el aluminio es imprescindible verlo sin ataque, ya que se muestran detalles microestructurales (fases que con el ataque cambian de color, e inclusiones no metálicas tales como óxido de aluminio). Hacer esto, garantiza una mejor diferenciación al momento del ataque.

Una consideración importante que debemos tener en cuenta, es la elección adecuada del reactivo de ataque, ya que, cada reactivo se emplea para el uso específico al que está destinado y exactamente de acuerdo a las instrucciones adecuadas para su empleo. Los detalles de la estructura revelada por el ataque, dependerán del tipo de atacante utilizado.

Los reactivos de ataque se aplican, en general, por inmersión de la probeta en el reactivo. Cuando se realiza el ataque por inmersión, se suspende la probeta, con su superficie pulida hacia abajo, dentro del reactivo, sujetándola con los dedos o con unas pinzas. Para desalojar burbujas de aire retenidas en la superficie y asegurar que bajo esa superficie siempre existe reactivo no gastado, se agita moderadamente la probeta, teniendo cuidado de que la superficie pulida no se raye. Inmediatamente después de la inmersión, se puede observar que la superficie pulida se torna más o menos mate. Esto indica que el ataque progresa.

Cuando el tiempo transcurrido en el ataque, se considera suficiente o así lo estipulan las instrucciones, se retira la probeta del reactivo, y rápidamente se le introduce en un chorro de agua. De esta manera se detiene inmediatamente la acción del reactivo y se elimina toda traza del mismo en la superficie de la probeta. Seguidamente, se le lava con agua destilada y luego con alcohol etílico, para quitar las gotas de agua y tener un mejor secado con aire caliente.

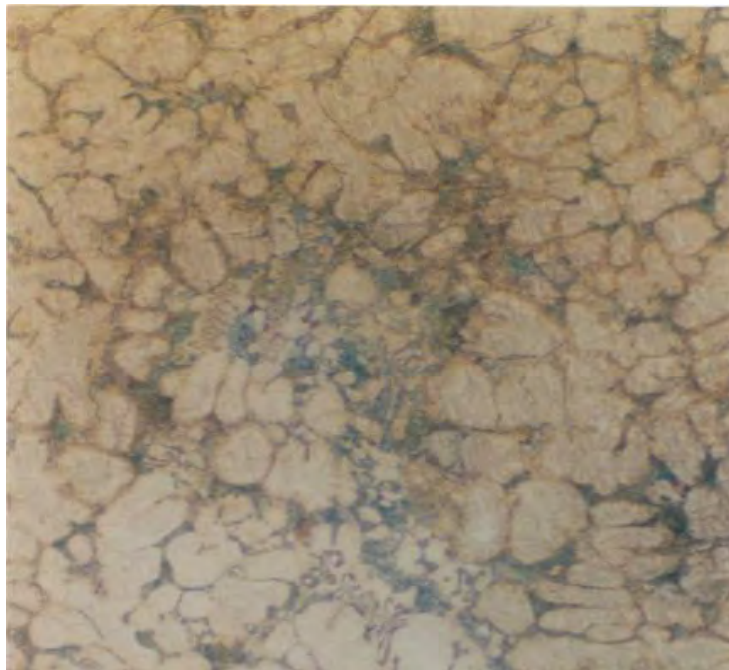
El tiempo de ataque es otro factor que sigue directamente en importancia a la elección adecuada del reactivo, porque puede resultar en un sobre ataque o escaso ataque. También, el aspecto visual de una estructura atacada o la calidad de una fotomicrografía de ella, dependen fundamentalmente del tiempo de ataque. Según el metal atacado y el reactivo empleado, los tiempos de ataque pueden oscilar entre pocos segundos a varios minutos.

El sobreataque es tan inadecuado como el ataque escaso, el sobreataque puede ocultar muchos detalles finos y ensanchar los límites de grano logrando una imagen no verdadera. Cuando la probeta está sobre atacada siempre es necesario volver a pulirla sobre el disco final y, luego, volver a repetir el ataque durante un tiempo más corto. En la figura 4.7, se muestra una probeta sobre atacada.

---

<sup>70</sup> Este apartado ha sido realizado utilizando las referencias [10], [12] y [13].

Figura 4.7. **Probeta de aluminio atacada con reactivo de Keller durante 8 segundos. Aumento 200X**



Los reactivos de ataque utilizados en el presente trabajo son los siguientes:

- 1) Ácido Fluorhídrico (HF): 0.5 ml HF<sub>(48%)</sub>, 100 ml H<sub>2</sub>O.
- 2) Ácido Fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>): 10 ml H<sub>3</sub>PO<sub>4(85%)</sub>, 90 ml H<sub>2</sub>O.
- 3) Reactivo de Keller: 2 ml HF<sub>(48%)</sub>, 3 ml HCl<sub>(conc.)</sub>, 5 ml HNO<sub>3 (conc.)</sub>, 190 ml H<sub>2</sub>O.
- 4) Ácido Nítrico (HNO<sub>3</sub>): 25 ml HNO<sub>3 (conc.)</sub>, 75 ml H<sub>2</sub>O.

Para el manejo de reactivos, hay que tomar las precauciones necesarias a fin de evitar derrames, fugas e inhalación de vapores; como por ejemplo, usar mascarilla, guantes y manipular los reactivos en un lugar adecuado, es decir que tenga campana extractora de vapores. Además, se debe estar bien instruido acerca de los procedimientos para casos de emergencia y sobre la forma de proporcionar primeros auxilios en caso de contacto con el ácido o sus vapores.

Por otro lado, algo importante a tener en cuenta al momento de guardar el reactivo o solución, es el recipiente, ya que este puede ser de vidrio o plástico, claro u oscuro, dependiendo si el reactivo es corrosivo y/o fotosensible. Esto para que el reactivo no se inutilice.

A continuación se indica el tipo de recipiente que se debe utilizar para guardar cada reactivo químico utilizado.

Solución de HF: Atacan a los silicatos en general, por lo que deben guardarse exclusivamente en recipientes de plástico de color oscuro.

Solución Reactivo de Keller: Se puede guardar en envase de plástico oscuro.

Solución HNO<sub>3</sub>: Envase de vidrio oscuro

Solución H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>: Almacenar en recipientes de polipropileno, y cerrados a la luz solar.

## Capítulo 5

### Análisis Metalográfico: Reconocimiento de fases y discusión

#### 5.1 Identificación de fases<sup>71</sup>

La identificación de fases se debe intentar únicamente después de una examinación previa de la muestra pulida para determinar los colores naturales de las fases.

En general, las fases pueden desarrollar diversas morfologías con resultados de microestructuras, que pueden ir desde una monofásica simple (solución sólida), hasta estructuras de diversas morfologías polifásicas.

La aparición de estas diversas morfologías, las cuales pueden tener una fuerte influencia sobre las propiedades, depende de la composición química de la aleación, del mecanismo de aparición de fases (solubilidad, eutéctica, compuesto químico), del mecanismo de solidificación y/o posteriormente, en estado sólido, del tratamiento térmico.

Según el diagrama de equilibrio, las fases que aparecen en las aleaciones de aluminio pueden ser los elementos de aleación en sí mismos, compuestos que no necesariamente contienen aluminio, o, compuestos que contienen aluminio y uno o más elementos de aleación. En el tabla 5.1 siguiente, se presentan las fases más comunes de las aleaciones comerciales, por lo tanto se muestran las posibles fases que deberíamos encontrar en nuestras aleaciones pertenecientes al grupo 3xx.x de las aleaciones de aluminio moldeadas.

---

<sup>71</sup> Este apartado ha sido realizado utilizando las referencias [2], [9].



Tabla 5.1. Fases comunes de las aleaciones de aluminio comerciales.

ALEACIONES –FUNDIDAS	CONSTITUYENTES DE FASES	ESTADO – TRATAMIENTO TERMICO
1xx.x (Al > 99.00%), 7xxx(Zn)	Si, $\beta$ -AlFeSi, $\alpha$ -Al(FeSi)	...
2xx.x (Cu), Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mn, Al-Cu-Si-Mg, Al-Cu-Mn-Mg-Ni, Al-Cu-Mg-Ni, Al-Cu-Si	Si, Al <sub>2</sub> Cu, Al <sub>2</sub> CuMg, Al <sub>7</sub> Cu <sub>2</sub> Fe, Al <sub>5</sub> Cu <sub>2</sub> Mg <sub>8</sub> Si <sub>6</sub> , $\beta$ -AlFeSi, $\alpha$ -Al(FeMnSi), AlCuFeNi, Al <sub>6</sub> Cu <sub>3</sub> Ni	Al <sub>2</sub> Cu, Al <sub>2</sub> CuMg, Al <sub>20</sub> Cu <sub>2</sub> Mn <sub>3</sub> , Al <sub>7</sub> Cu <sub>2</sub> Fe, AlCuFeNi, Al <sub>6</sub> Cu <sub>3</sub> Ni, Al <sub>3</sub> Ni
3xx.x (Si + Cu/Mg), Al-Cu-Si, Al-Si-Cu-Mg-Ni, Al-Si-Cu-Mg, Al-Si-Mg, Al-Si-Mg-Fe, Al-Si-Mg-Ti, Al-Si-Mn-Mg-Cu	Si, Al <sub>2</sub> Cu, Al <sub>2</sub> CuMg, Al <sub>7</sub> Cu <sub>2</sub> Fe, Al <sub>5</sub> Cu <sub>2</sub> Mg <sub>8</sub> Si <sub>6</sub> , $\beta$ -AlFeSi, $\alpha$ -Al(FeMnSi), AlCuFeNi, Al <sub>6</sub> Cu <sub>3</sub> Ni, Mg <sub>2</sub> Si, Al <sub>3</sub> Ni, Al <sub>9</sub> NiFe, Al <sub>8</sub> Mg <sub>3</sub> FeSi <sub>2</sub>	Si, Al <sub>2</sub> Cu, Al <sub>2</sub> CuMg, Al <sub>7</sub> Cu <sub>2</sub> Fe, AlCuFeNi, Al <sub>6</sub> Cu <sub>3</sub> Ni, Al <sub>3</sub> Ni, Al <sub>20</sub> Cu <sub>2</sub> Mn <sub>3</sub> , Al <sub>8</sub> Mg <sub>3</sub> FeSi <sub>2</sub> , Al <sub>5</sub> Cu <sub>2</sub> Mg <sub>8</sub> Si <sub>6</sub> , $\beta$ -AlFeSi, $\alpha$ -Al(FeMnSi)
4xx.x (Si), Al-Si, Al-Si-Cu, Al-Si-Fe	Si, Al <sub>2</sub> Cu, $\beta$ -AlFeSi, $\alpha$ -Al(FeMnSi)	Si, Al <sub>2</sub> Cu, $\beta$ -AlFeSi, $\alpha$ -Al(FeMnSi)
5xx.x (Mg), Al-Mg	Mg <sub>2</sub> Si, Al <sub>6</sub> (FeMn), Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub> , Al <sub>18</sub> Mg <sub>3</sub> Cr <sub>2</sub>	Mg <sub>2</sub> Si, Al <sub>6</sub> (FeMn), Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub> , Al <sub>18</sub> Mg <sub>3</sub> Cr <sub>2</sub>
7xx.x (Zn)	Al <sub>18</sub> Mg <sub>3</sub> Cr <sub>2</sub> , Al <sub>3</sub> Fe, Al <sub>7</sub> FeCr, MgZn <sub>2</sub>	...
8xx.x (Sn)	Si, Sn, Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub> , Al <sub>3</sub> Ni	Si, Sn, Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub> , Al <sub>3</sub> Ni, Al <sub>6</sub> Cu <sub>3</sub> Ni

Fuente: **Metal Handbook, Edición 10, volumen 9, Metallography and Microstructures.**

La parte más importante de la metalografía es el examen microscópico de una probeta adecuadamente preparada. En este caso, el microscopio óptico empleado tiene aumentos, que oscilan entre 50x y 1000x de aumento.

La información dada por distintos autores sobre el comportamiento de los microconstituyentes ante los diferentes reactivos es incompleta y en ocasiones contradictoria, lo que se convierte en una dificultad al momento de identificar correctamente una fase.

Esto se comprueba al comparar las tablas que se han encontrado para el presente trabajo.

La identificación metalográfica de las diferentes fases se tratará de realizar a partir de su morfología y su respuesta al ataque químico.

Para el procedimiento del uso de los reactivos de ataque, se ha tomado como base, lo descrito en la siguiente tabla 5.2.

Tabla 5.2. Reactivos para la examinación microscópica en las aleaciones de aluminio.

ETCHANT	COMPOSITION	PROCEDURE FOR USE
1 (HF etch).....	1 mL HF (48%), 200 mL H <sub>2</sub> O	Swab for 15 s or immerse for 30-45 s
2 .....	1 g NaOH, 100 mL H <sub>2</sub> O	Swab for 5-10 s
3A (Keller's reagent)...	2 mL HF (48%), 3 mL HCl (conc.), 5 mL HNO <sub>3</sub> (conc.), 190 mL H <sub>2</sub> O	Immerse for 8-15 s, wash in stream of warm water, blow dry. Do not remove etching products from surface.
3B (Dilute Keller's reagent).....	20 mL, etchant 3A, 80 mL H <sub>2</sub> O	Mix fresh before using. Immerse specimen for 5-10 s.
4 (Modified Keller's reagent).....	2 mL HF (48%), 3 mL HCl (conc.), 20 mL HNO <sub>3</sub> (conc.), 175 mL H <sub>2</sub> O	Immerse for 10-60 s, wash in stream of warm water, blow dry. Do not remove etching products from surface.
5 (Barker's reagent).....	4 to 5 mL HBF <sub>4</sub> (48%), 200 mL H <sub>2</sub> O	Electrolytic: use aluminum, lead, or stainless steel for cathode, specimen is anode.
6 .....	25 mL HNO <sub>3</sub> (conc), 75 mL H <sub>2</sub> O	Immerse in solution at 70°C for 45-60 s
7 .....	20 mL H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (conc.), 80 mL H <sub>2</sub> O	Immerse in solution at 70°C for 30 s; rinse in cold water.
8 .....	10 mL H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (85%), 90 mL H <sub>2</sub> O	Immerse in solution at 50°C for 1 min or 3-5 min; rinse in cold water.
9 .....	5 mL HF (48%), 10 mL H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 85 mL H <sub>2</sub> O	Immerse for 30 s.
10 .....	2 g NaOH, 5 g NaF, 93 mL H <sub>2</sub> O	Immerse for 2-3 min.
11 .....	8 ml HNO <sub>3</sub> (conc), 2 mL HCl (conc.), 45 mL H <sub>2</sub> O, 45 mL methanol	Immerse for 10 s.
12 .....	5 mL acetic acid (glacial), 1 mL HNO <sub>3</sub> (conc.), 94 mL H <sub>2</sub> O	Immerse for 20-30 min.
13 (Graff/Sargent reagent).....	15.5 mL HNO <sub>3</sub> (conc.), 0.5 mL HF (48%), 3 g CrO <sub>3</sub> , 84 mL H <sub>2</sub> O	Mix fresh before using. Use at room temperature. Immerse sample and agitate mildly for 20-60 s. A second etching in Keller's reagent may further develop the structure.

Fuente: **Metal Handbook, Edición 9, Volumen 9, "Metallography and Microstructures"**.

La forma y el color de las fases antes del ataque, y la respuesta frente a los diversos reactivos de ataque, según la diversa bibliografía consultada se muestran en las tablas 5.3.a y 5.3.b.

Tabla 5.3.a Forma y color de la fases sin ataque; y la respuesta de las fases frente a los distintos reactivos de ataque.

	ANTES DEL ATAQUE QUÍMICO		RESPUESTA AL ATAQUE QUIMICO - SEGÚN DIVERSOS AUTORES			
	Forma	Color	HF	H <sub>3</sub> P0 <sub>4</sub>	KELLER	HNO <sub>3</sub>
<b>β-Al<sub>5</sub>FeSi</b>	Agujas (1) <sup>72</sup> , laminar, a veces ramificado. Formas esqueléticas (4)	Gris(1), Gris amarillento(4)	Marrón claro (1), ligeramente atacado (4). Ataca y oscurece (3)	El color cambia a marrón(4)	Marrón oscuro (2) <sup>73</sup> , El color cambia a marrón (4).	Ligeramente atacado (1) Muy ligero ataque (4)
<b>Al<sub>3</sub>Fe</b>	Agujas alargadas o forma de estrellas (3) <sup>74</sup> . Granos laminares (4) <sup>75</sup> . Forma de agujas o rosetas (1)	Gris metálico Claro(3)  Gris (4) Gris púrpura(2)	A marrón oscuro (2), (4)  Atacado (1)	Marrón oscuro a negro azulado(3)  Fuertemente atacado (4)	Ligeramente atacado(2)	Fuertemente atacado, oscurece (4)  No ataca (2)
<b>Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe</b>	Escritura china(1) Agujas(1)	Gris claro delineado(1)	Delineado (1)	No ataca (4)		Oscurece (1)
<b>Al<sub>3</sub>Ni</b>	Escritura China (1)  Estructura laminar (4)	Gris claro delineado(1)  Gris amarillento(2)	Azul oscuro a marrón oscuro (4). De marrón a azul (2) Oscurece (1) Delineado , color marrón y azul (5) <sup>76</sup>	Ataca, se oscurece, ennegrece(4)	De marrón a negro (2)  Marrón a negro (5)	No ataca(1), (2)
<b>α-Al(FeMnSi)</b>	Escritura China (1)	Gris (2) Gris metálico claro (3)	Marrón Claro(1) Marrón Oscuro (2)	Oscurece a tonos marrones (3)	Marrón claro (2)	Ligeramente atacado (1) No ataca (2)
<b>Al<sub>8</sub>Mg<sub>3</sub>FeSi<sub>2</sub></b>	Escritura China (1) Formas irregulares en eutéctica (3)	Gris Claro, no delineado	Gris brillante, delineado(1) No ataca (3)	Ligeramente atacado, gris oscuro (4)		Marrón (1)

Fuente: **Metal Handbook, Ediciones 9-10, Volumen 9, “Metallography and Microstructures”.**

<sup>72</sup> Metal Handbook, Edición 10, Volumen 9, Metallography and Microstructures, 2004.

<sup>73</sup> L.F. Mondolfo: “Metallography of aluminium alloys”

<sup>74</sup> Metal Handbook, Edición 9, Volumen 9, Metallography and Microstructures, 1988.

<sup>75</sup> I. Kolobnev: “Heat Treatment aluminium alloy”

<sup>76</sup> Research Laboratory. Aluminum Co. Of America.

Tabla 5.3.b. Forma y color de la fases sin ataque; y la respuesta de las fases frente a los distintos reactivos de ataque

	Forma	Color	HF	H <sub>3</sub> P0 <sub>4</sub>	KELLER	HNO <sub>3</sub>
<b>Si</b>	Poliedro (1) Escritura China (1)	Gris azulado (1) Gris pizarra (2) Gris azulado claro (3)	Delineado (1)	No ataca (4)		
<b>Mg<sub>2</sub>Si</b>	Escritura China (1)	Azul (1) azul-gris más oscuro que el Si, azul o negro (3)	Azul (1)	Ataca, el color se oscurece (4)		Atacado / Disolución (1)
<b>Al<sub>2</sub>Cu</b>	Partículas irregulares redondeadas (1)	Rosado pálido (2)  Rosado-amarillento, delineado (1)	No ataca (2) Desaparece el color rosado y se pone gris claro (4)  Rosado (1)	Ligeramente atacado (4)	No ataca (2)	Negro (2) Atacado. Desde marrón a negro (4)  Oscurece y hace visible el límite de grano ((3)
<b>Al<sub>2</sub>CuMg</b>	Partículas irregulares redondeadas (1)	Más oscuro que el Al <sub>2</sub> Cu (1) Gris amarillento (4)	No ataca (1)	A marrón oscuro (4)	A marrón oscuro (4)	Delineado (1) Ataca, oscurece (4)
<b>Al<sub>9</sub>NiFe</b>	Placas irregulares (1)	Gris, delineado (1) Gris (2)	Marrón oscuro a azul (2)		De marrón oscuro a azul (2)	No ataca (1), (2)
<b>Al<sub>5</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>6</sub></b>	Partículas irregulares redondeadas (1)  Forma esqueléticas (4)	Amarillo brillante, delineado (1)  Gris (2)	De marrón a negro (1) De marrón oscuro a negro (2) Marrón oscuro (4)	No ataca (4)	Ligeramente atacado (4)	Azul (1)  Azul oscuro a negro (2)  Marrón oscuro (4)

Fuente: Metal Hambook, Ediciones 9-10, Volumen 9, “Metallography and Microstructures”

## 5.2 Análisis metalográfico

El objetivo al que se quiere llegar mediante la realización del análisis metalográfico consiste en la identificación de los diferentes constituyentes presentes en la aleación. El método que se usa es la observación morfológica de cada fase, así como la aplicación de un adecuado ataque, cuyos resultados intentaremos deducir a partir de la tabla de respuestas 5.3.

En primer lugar se va a desarrollar la aleación 319.2 y posteriormente la aleación 384.2.

Dentro del estudio de cada aleación, se dará a conocer en primer lugar, la microestructura típica, es decir los constituyentes que se espera encontrar, en segundo lugar, en base a la morfología de las fases, éstas se examinarán considerando tres grupos.

- Constituyentes de formas redondeadas y placas irregulares
- Constituyentes del tipo chinescas
- Constituyente de formas alargadas (*blades*)

Dentro de cada grupo, primero se va a mostrar las características sin ataque y luego la respuesta ante los distintos reactivos de ataque.

Los tiempos y los procedimientos de los ataques realizados se han hecho teniendo en cuenta la tabla 5.1.

### 5.2.1 Estudio metalográfico de la aleación 319.2

#### a) Microestructura característica

Lo más característico o típico de esta aleación es la matriz dendrítica, constituida por solución sólida de silicio en aluminio. Como fases dispersas se observa una red interdendrítica de silicio; partículas irregulares redondeadas, constituyentes que reciben el nombre de fases de tipo chinescas y, fases con forma de agujas, que se conocen como blades.

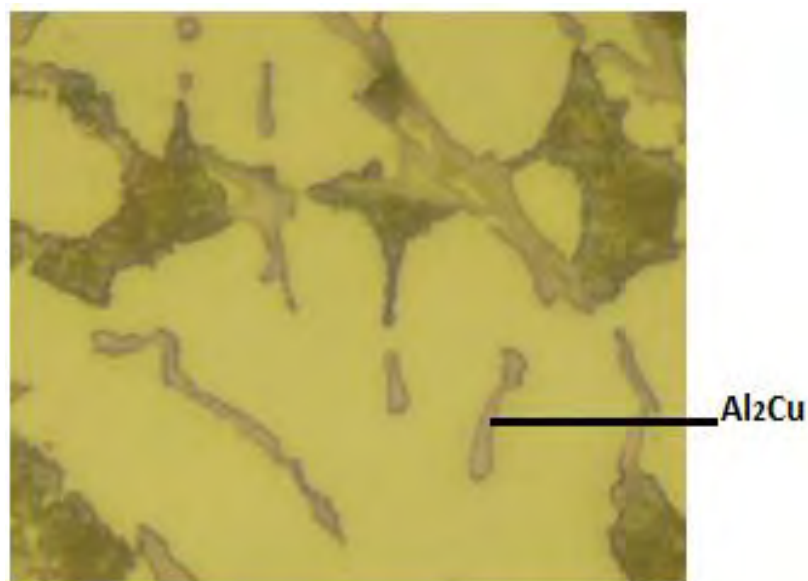
#### b) Constituyentes de formas redondeadas o placas irregulares

En esta aleación hay un constituyente de fácil identificación, para cuyo reconocimiento no es imprescindible el ataque químico, este compuesto es el  $Al_2Cu$ . A continuación, se va a describir dicha fase, primero se muestra la fase sin ataque y luego la respuesta de la fase frente a los reactivos de ataque (ácido fluorhídrico y ácido nítrico)

##### b.1) Sin ataque

Es el constituyente más conocido de la aleación. Su morfología es de partículas irregulares redondeadas de un color rosado pálido, como se muestra en la figura 5.1.

Figura 5.1. Partículas de  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , sin ataque químico. Aumento 1000X.



b.2) Con ataque

b.2.1) Ataque con HF

De acuerdo a la tabla 5.1, se debía atacar de 30 a 45 segundos por inmersión. Se hizo un primer ataque de 30 segundos, en la figura 5.2 se puede observar que las partículas de  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , han resaltado su color rosado y se han delineado sus límites de grano. En un segundo ataque, de 10 segundos adicionales, se observa en la figura 5.3 que las partículas de  $\text{Al}_2\text{Cu}$  han perdido su color rosado y se tornaron de un color gris claro.

Figura 5.2. Ataque por 30 segundos; los precipitados de  $\text{Al}_2\text{Cu}$  se han delineado y resaltado su color rosado. Aumento 1000 X.

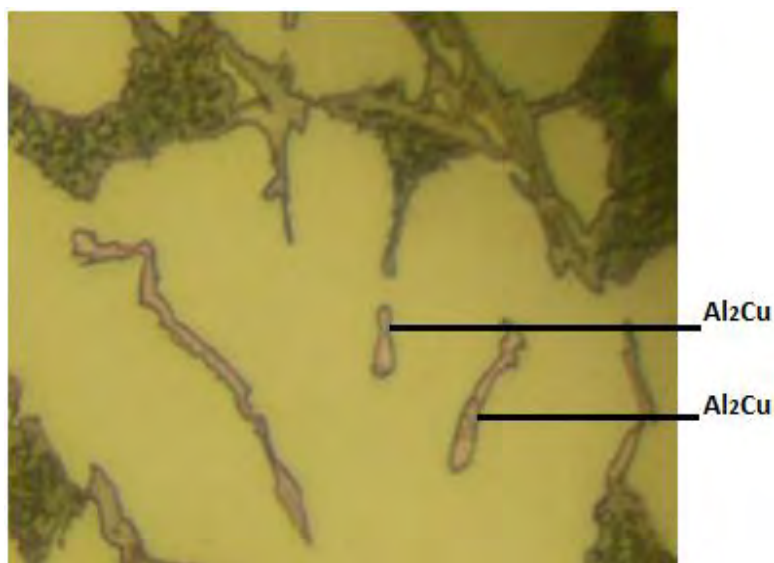
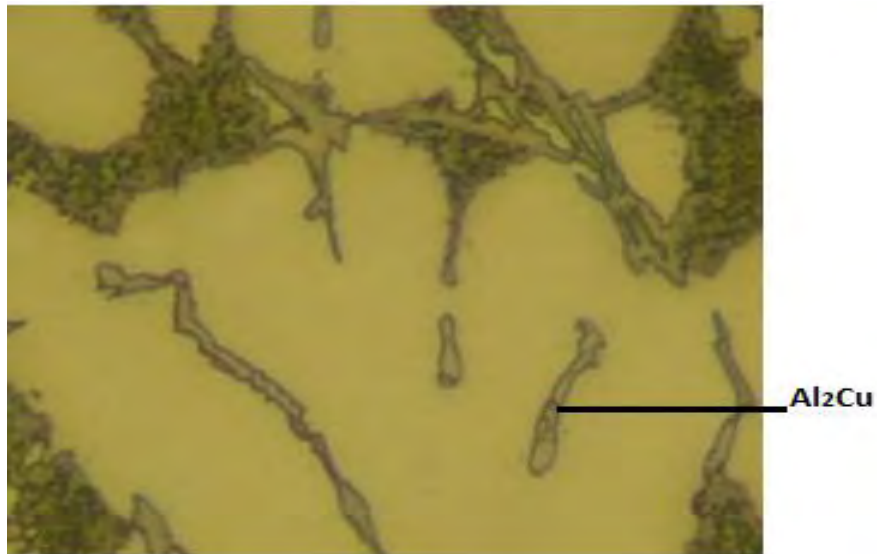


Figura 5.3. Ataque por 40 segundos; los precipitados de  $\text{Al}_2\text{Cu}$  han perdido su color rosado y se han puesto de un color gris claro. Aumento 1000 X.

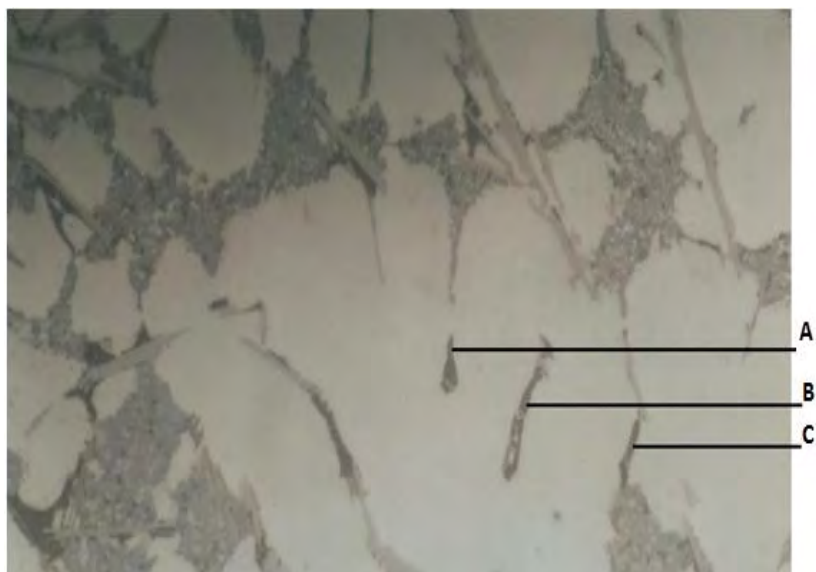


Se puede decir que se obtiene un mejor ataque químico con el ácido fluorhídrico cuando se ataca por 40 segundos., ya que con este tiempo se logra cambiar el color de la fase.

#### b.2.2) Ataque con $\text{HNO}_3$

Por inmersión a  $70^\circ\text{C}$  durante 60 segundos se consigue un buen ataque, y las partículas de  $\text{Al}_2\text{Cu}$  se tornan de color negro e incluso se ve disuelto parcial o totalmente (A, B y C), como se puede observar en la figura 5.4.

Figura 5.4. Ataque con  $\text{HNO}_3$  durante 60 segundos a  $70^\circ\text{C}$ . Aumento 1000X.



Como se puede observar, los dos reactivos de ataque utilizados (ácido fluorhídrico y ácido nítrico) atacan a la fase  $\text{Al}_2\text{Cu}$ .

El ácido nítrico muestra un ataque más profundo, pero tiene como desventaja que no es muy práctico, ya que se necesita llevar al reactivo a una temperatura de 70°C. Para hacer esto, siempre hay que calentar al reactivo de 5 a 10 °C por encima de la temperatura deseada, para compensar la pérdida de calor que se origina al verter el reactivo a una luna de vidrio y demoras en las que puede incurrir el operador.

### c) Constituyentes del tipo chinescas

#### c.1) Sin ataque

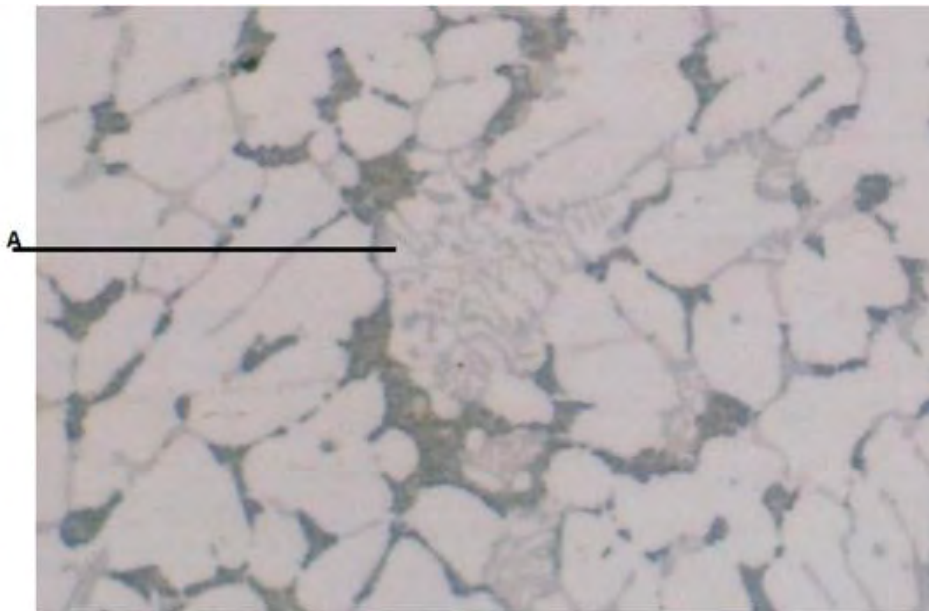
Las fases con hierro y manganeso presentes en esta aleación parecen estar mayoritariamente referidas a los constituyentes que morfológicamente se asemejan a signos de escritura china, y que reciben el calificativo de fases de tipo chinescas.

De acuerdo a la tabla 5.2 las fases, del tipo chinescas con composición de hierro y manganeso son:  $\alpha$ -Al(FeMnSi),  $Al_8Mg_3FeSi_2$ ,  $Al_5SiFe$ ,  $Al_7Cu_2Fe$ .

Existen otros constituyentes de tipo chinescos y de formas esqueléticas, que no tienen en su composición hierro y/o manganeso y son las siguientes: Si,  $Mg_2Si$ ,  $Al_3Ni$ .

En la figura 5.5.a., se muestra una fase de morfología chinescas o esquelética de un color gris muy claro (A).

Figura 5.5.a. Fases chinescas sin ataque. Micrografía 200X.



Las fases que se muestran en las figuras 5.5.b y 5.5.c son de color gris metálico claro. Las fotografías han sido tomadas con distintas luz de fondo, la primera con luz blanca y la segunda con luz azul.



Figura 5.5.b Formas esqueléticas sin ataque .  
Aumento 1000 X.

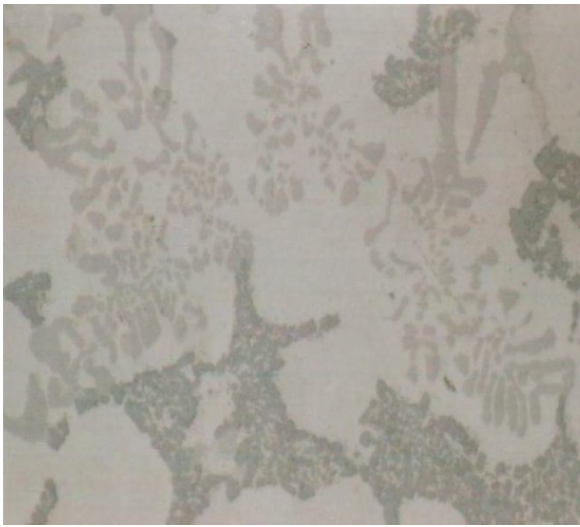


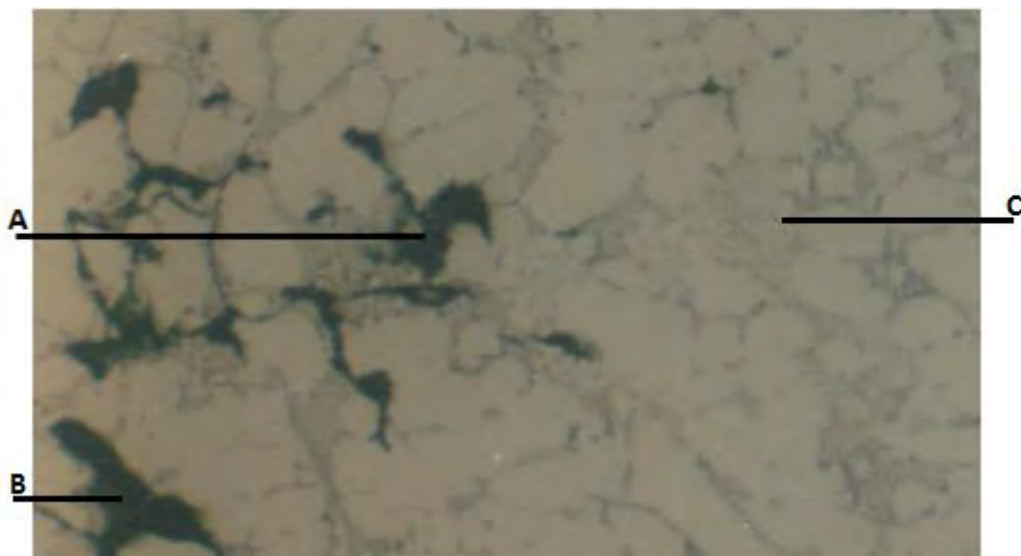
Figura 5.5.c Chinescas sin ataque  
Aumento 1000 X.



En la figura 5.5.d., también se muestran fases chinescas (C), pero lo que se quiere resaltar en esta figura son las inclusiones no metálicas de color negro, que sería óxido de aluminio, y/o porosidad (que es común en este tipo de aleaciones). Para poder diferenciar uno de lo otro, se muestra la figura 5.5.e., donde es bastante claro que (B) es un poro.

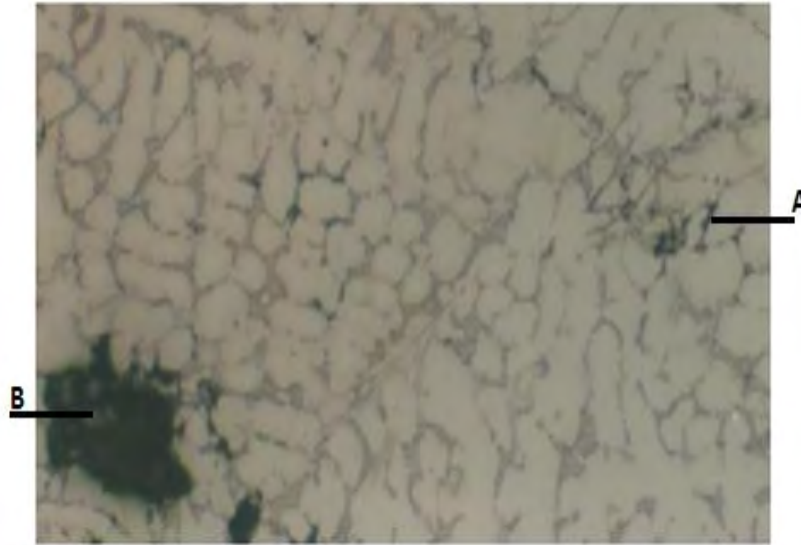
En la bibliografía consultada<sup>77</sup>, se han podido observar micrografías donde muestran inclusiones no metálicas y porosidad y se ve que las inclusiones no metálicas u óxido de aluminio forman como un mapa y son más finas, por lo que, se puede decir que en la figura 5.5.d., (B) es un poro y el resto (A) se trata de óxido de aluminio. Y en la figura 5.5.e., (A), es óxido de aluminio.

Figura 5.5.d. Sin ataque. Aumento 200X.



<sup>77</sup> ASM Handbook – Volume 9. [5]

Figura 5.5.e. Sin ataque. Aumento 200X.



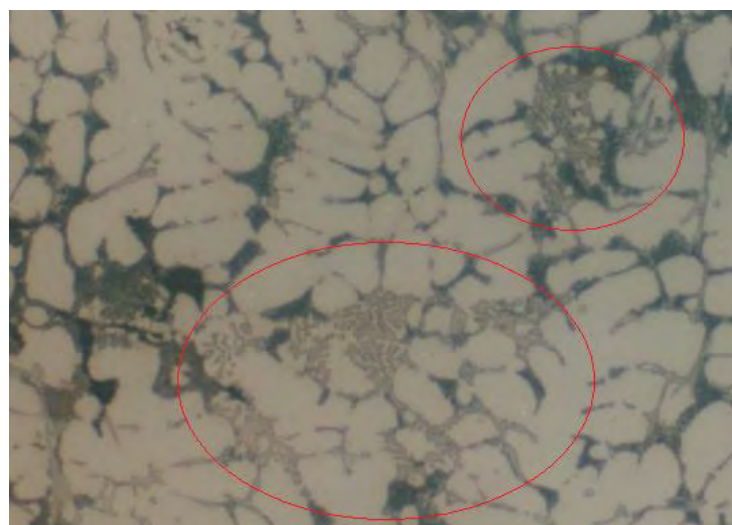
Si estudiamos el comportamiento de estos chinscos frente a los diferentes reactivos de ataque, se obtienen los siguientes resultados:

c.2) Con ataque

C.2.1) Ataque con HF

Por inmersión en solución de HF, las figuras 5.6.a. y 5.6.b muestran el resultado del ataque durante 30 segundos y las figuras 5.6.c y 5.6.d muestran un ataque durante 40 segundos. Con el primer ataque de 30 segundos, las fases chinscas se pintan de color marrón y con 10 segundos más de ataque, el color marrón se ve intensificado. De acuerdo, a las tablas de respuestas 5.2.a. y 5.2.b, esta fase sería  $\alpha$ -Al(FeMnSi).

Figura 5.6.a. Ataque con HF durante 30 segundos. Aumento 200X.



En la figura 5.6.b. aparte de la fase chinesca (A) que cambió de color, se ve que hay unas partículas irregulares (B) que también cambiaron a color marrón y otras fases laminares (C) que se ven delineadas y de color gris oscuro.

Cuando en la aleación hay Mg presente aparece la fase  $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_2$ , denotada como fase- $\pi$ , y en bajas cantidades de magnesio 0.1-0.4%, se dice que la fase- $\pi$ , la cual tiene forma chinesca (cuando es eutéctico), aparece con morfología de bloque o partículas de formas irregulares (cuando es primario). En esta aleación, el contenido de magnesio es de 0.16 %W, por lo que se puede deducir que las partículas irregulares (C), que se muestran en la figura 5.6.b. pueden ser el compuesto intermetálico primario  $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_2$ .

Figura 5.6.b. Ataque durante 30 segundos. Aumento 200X.

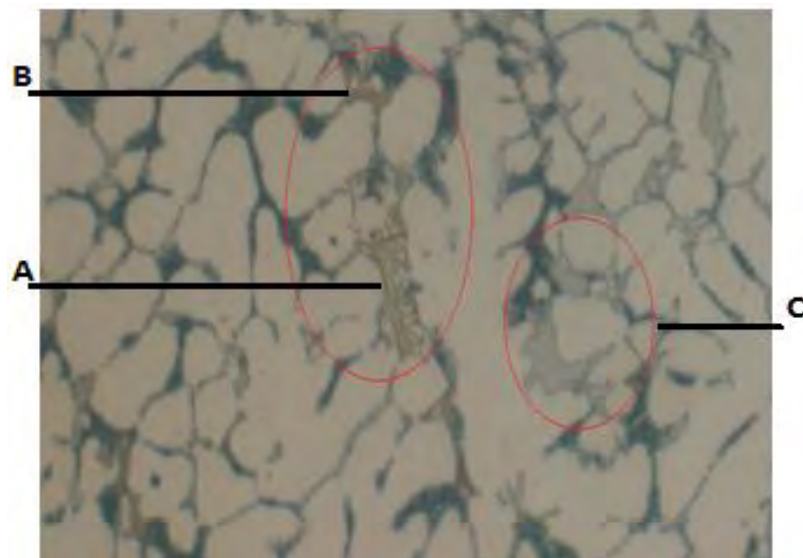


Figura 5.6.c. Ataque por 40 segundos. Aumento 200X.

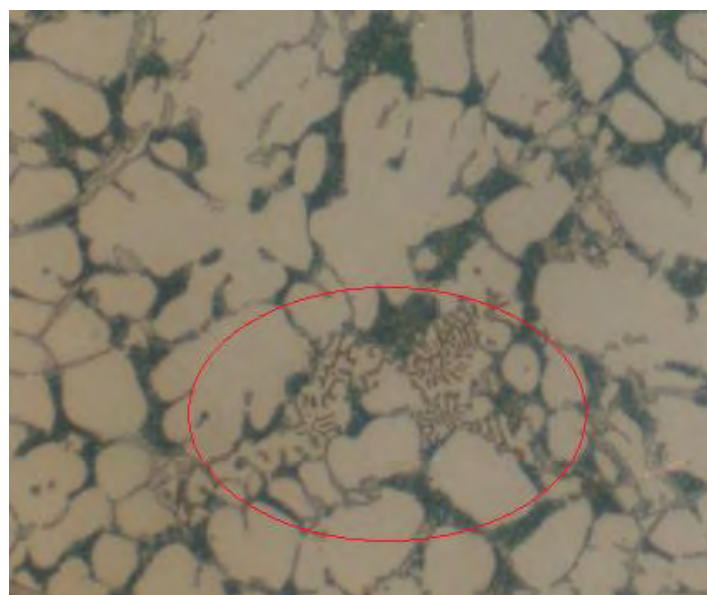
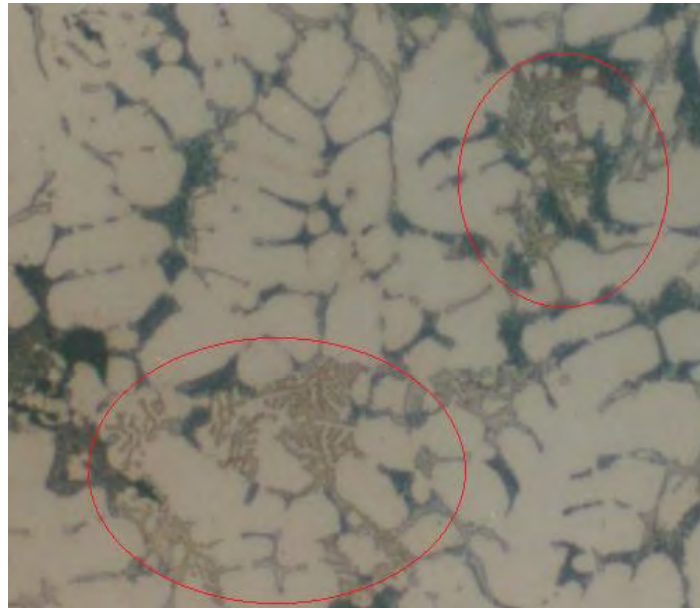


Figura 5.6.d. Ataque por 40 segundos. Aumento 200X.



Se ve claramente que con 40 segundos de ataque con ácido fluorhídrico, la respuesta al ataque es mejor.

#### C.2.2) Ataque con reactivo de Keller

Por inmersión en solución y enjugado con agua tibia. El tiempo de ataque que se recomienda en la tabla 5.2 está en un intervalo entre 8 y 15 segundos. Se hizo el ataque utilizando el tiempo mínimo de 8 segundos, pero tuvimos un sobreataque, por lo que se tuvo que empezar por tiempos menores.

En la figura 5.7.a se muestra el ataque durante 3 segundos y la figura 5.7.b muestra un ataque durante 5 segundos. En el segundo ataque lo que pasa es que se intensifica más el color azul de las chinescas.

Figura 5.7.a Ataque durante 3 segundos  
Aumento 200 X.

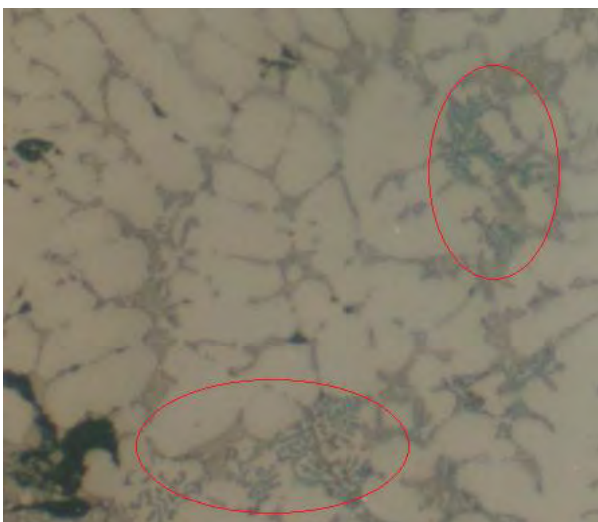
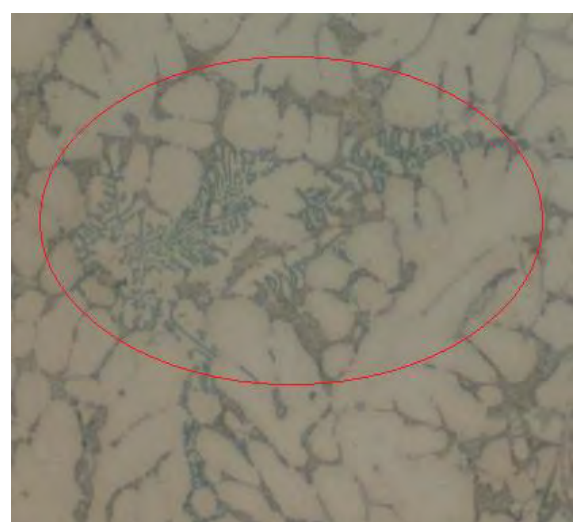


Figura 5.7.b Ataque durante 5 segundos  
Aumento 200 X.



En la bibliografía consultada, no se ha podido encontrar una respuesta al ataque con reactivo de keller, similar a la obtenida en este trabajo. Pero, si comparamos las figuras 5.6.d. y la figura 5.7.a, vemos que se trata de las misma fase  $\alpha$ -Al(FeMnSi), por lo tanto, podemos decir que su respuesta frente al ataque con reactivo de keller es de color azul.

### C.2.3) Ataque con ácido fosfórico

Por inmersión en solución a 50 °C. En la tabla 5.2, se indica que el tiempo de ataque debe ir entre 1 a 3 minutos y si aún no hay un buen ataque de 3 a 5 minutos. Se tomó el primer rango de tiempo y se hizo el ataque durante 2 minutos, y este ataque se muestra en la figura 5.8.a. y las figuras 5.8.b, 5.8.c y 5.8.d muestran ataque durante 2 minutos 45 segundos.

Figura 5.8.a. **Ataque durante 2 minutos. Aumento 1000X.**



Se puede observar, que los constituyentes chinoscos han cambiando de color, de gris claro a marrón oscuro.

Como el tiempo de ataque inicial fue un tiempo promedio, se hace un segundo ataque por 45 segundos adicionales, para acercarnos al límite superior recomendado, y este ataque se muestra en las figuras 5.8.b., 5.8.c. y 5.8.d.

Figura 5.8.b. Ataque a la fase chinesca (A) por 2 minutos 45 segundos. Aumento 200X.

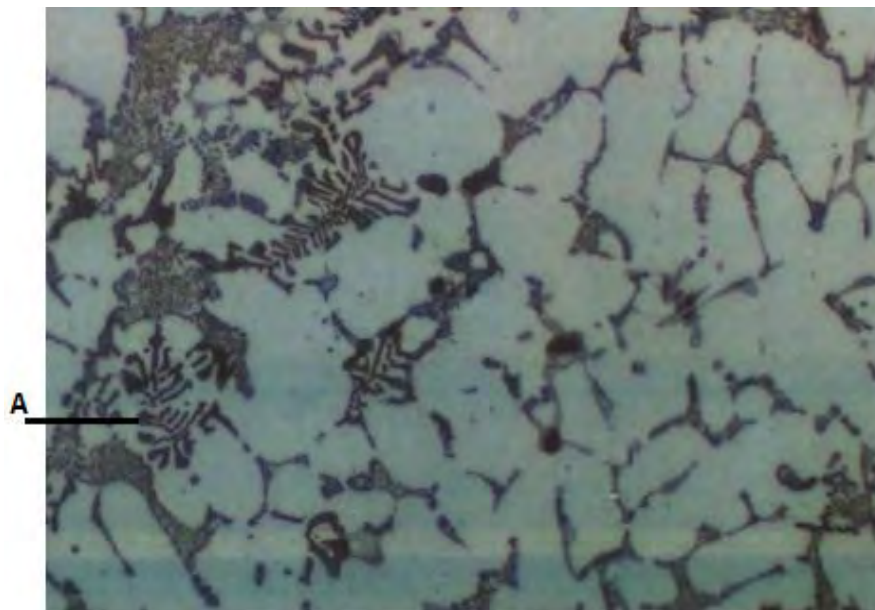
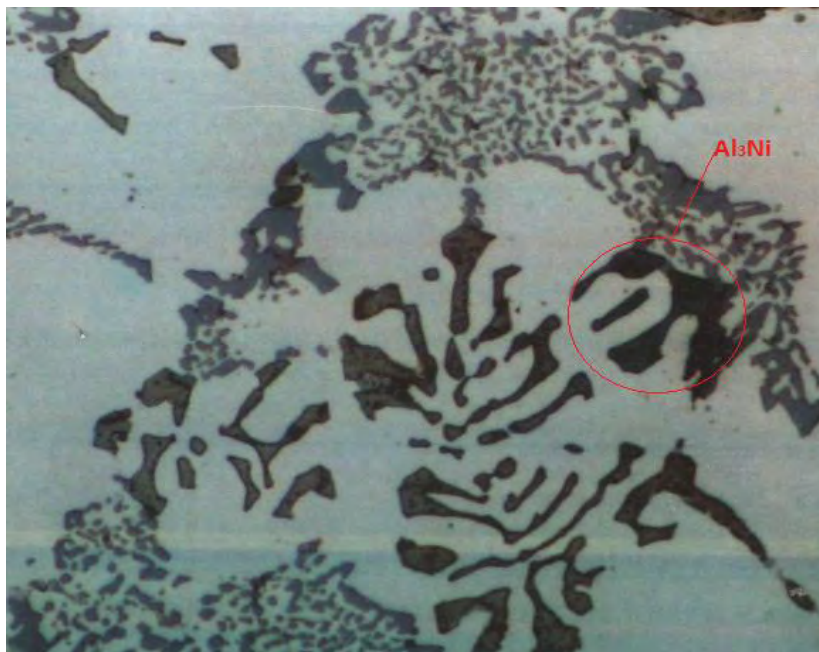


Figura 5.8.c. Ataque por 2 minutos 45 segundos. Aumento 1000X.



En esta figura 5.8.c, aparte de la fase chinesca, se ve un constituyente laminar de color negro, que de acuerdo a la tabla 5.3.a., se trata de la fase  $Al_3Ni$ .

Figura 5.8.d. Ataque por 2 minutos 45 segundos. Aumento 1000X.



Se obtiene un mejor ataque o una mejor respuesta al ataque con un tiempo de 2 minutos 45 segundos, ya que el color se intensifica.

Tomando las tablas 5.3.a.y 5.3.b. y las respuestas obtenidas, se reconoce a la fase  $\alpha$ -Al(FeMnSi).

El reactivo que dio mejor resultado como atacante de las fases chinescas es el ácido fosfórico, porque la fase cambia a tonos marrones más intensos que los que resultan del ataque con ácido fluorhídrico. Lo que tiene en contra este reactivo de ataque, es que no es muy práctico ya que se necesita llevarlo a una temperatura de 50 °C y el tiempo de ataque es mayor.

El reactivo de ataque más rápido es el reactivo de Keller, ya que sólo basta con 5 segundos para obtener una respuesta, y es una respuesta distinta a los otros dos reactivos utilizados.

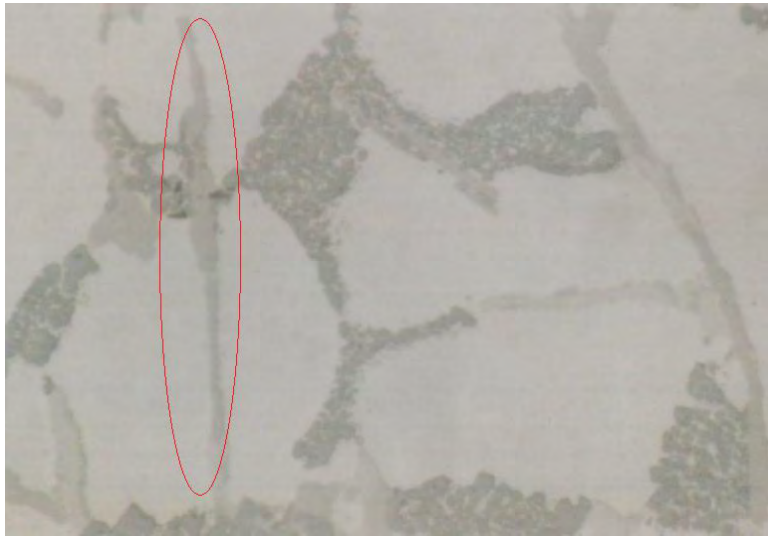
#### **d) Constituyentes de morfología alargada**

##### **d.1) Sin ataque**

Estos constituyentes en forma de agujas son también conocidos como *blades*, y son las fases más perjudiciales para las propiedades mecánicas de la aleación. Entre estas fases tenemos a las siguientes:  $\beta$ -AlFeSi,  $Al_3Fe$ ,  $Al_7Cu_2Fe$ .

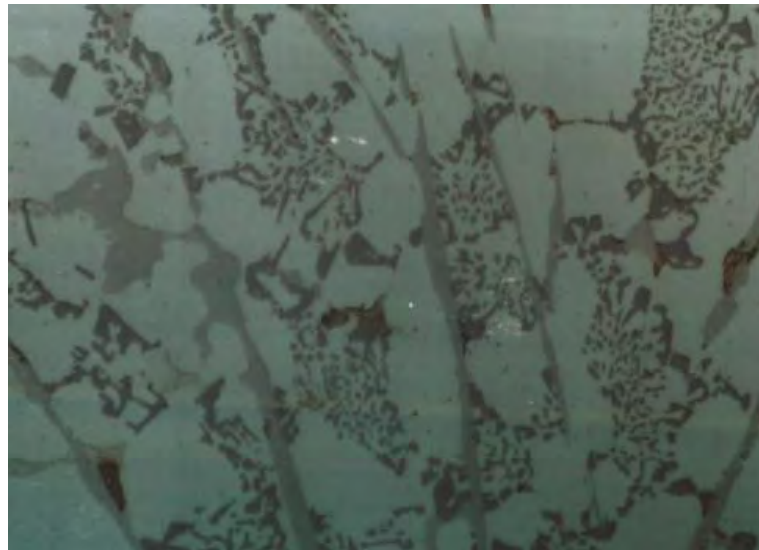
En la figura 5.9.a. se observa una fase de forma alargada de color gris claro.

Figura 5.9.a. Sin ataque. Aumento 1000X.



Y en la figura 5.9.b. se ven las fases alargadas como formando un racimo o más agrupadas, de color gris metálico claro. De acuerdo, a la forma como aparecen (agrupadas) y al color que tienen sin ataque, se puede decir que se trata de la fase  $Al_3Fe$  o  $\beta-Al_5FeSi$ , esto se va a confirmar con la respuesta al ataque.

Figura 5.9.b. Fases alargadas sin ataque. Aumento 200X.



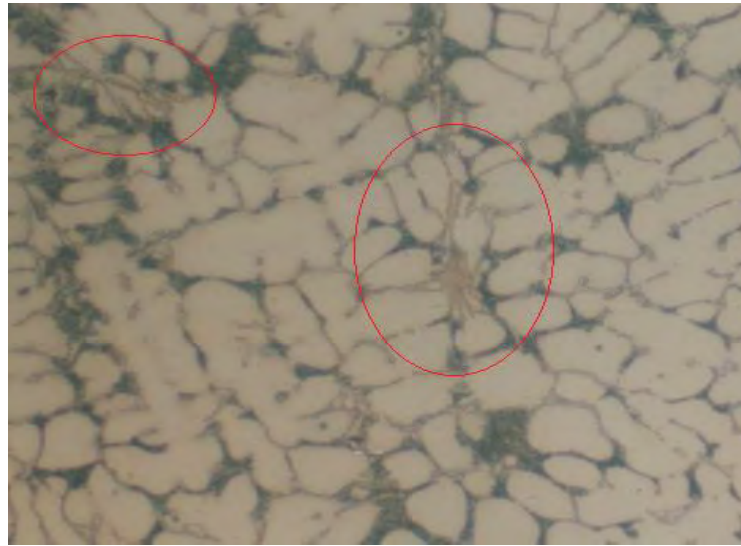
#### d.2) Con ataque

##### d.2.1) Ataque con ácido fluorhídrico

En la figura 5.10 se muestra, el ataque con ácido fluorhídrico, por inmersión en solución durante 30 segundos. El ataque causa que las agujas cambien a color marrón claro, y de acuerdo a la tabla de respuestas 5.3.a, esta fase se podría tratar de la fase  $\beta-Al_5FeSi$ .



Figura 5.10. Ataque por 30 segundos. Aumento 200X.



d.2.2) Ataque con ácido fosfórico

Las figuras 5.11.a y 5.11.b muestran el ataque por inmersión en solución a 50°C, durante 2 minutos y 2 minutos 45 segundos respectivamente. Las diferencias que se pueden observar entre los ataques, es que en el segundo ataque (figura 5.11.b.), las fases cambian de color marrón oscuro a un color negro azulado (B) y (C). También se puede ver que hay una fase que con 2 minutos de ataque (figura 5.11.a.) no sufre ningún cambio y con 2 minutos 45 segundos (figura 5.11.b.) se ve un leve ataque (A).

De acuerdo a las tablas de respuestas 5.3.a. y 5.3.b., los constituyentes alargados que cambian al color negro azulado, se trata de  $Al_3Fe$ .

Y el constituyente que no sufre ataque o un leve ataque, a mayor tiempo, se trata de la fase  $Al_7Cu_2Fe$ .

Figura 5.11.a. Ataque por 2 minutos. Aumento 1000X.

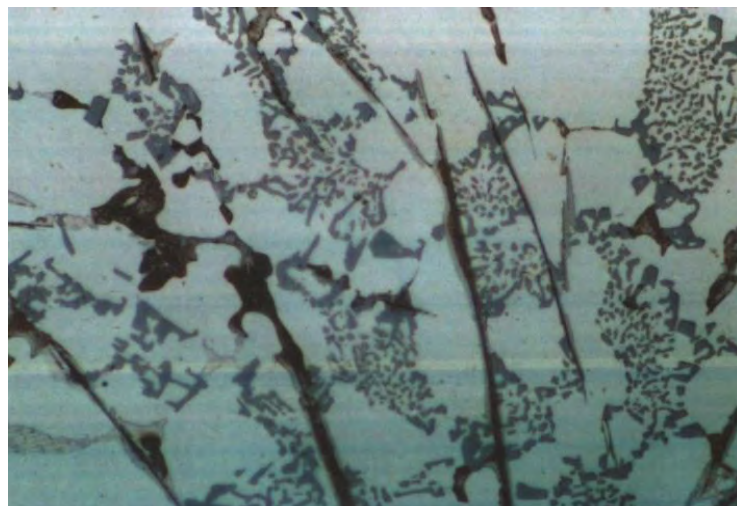
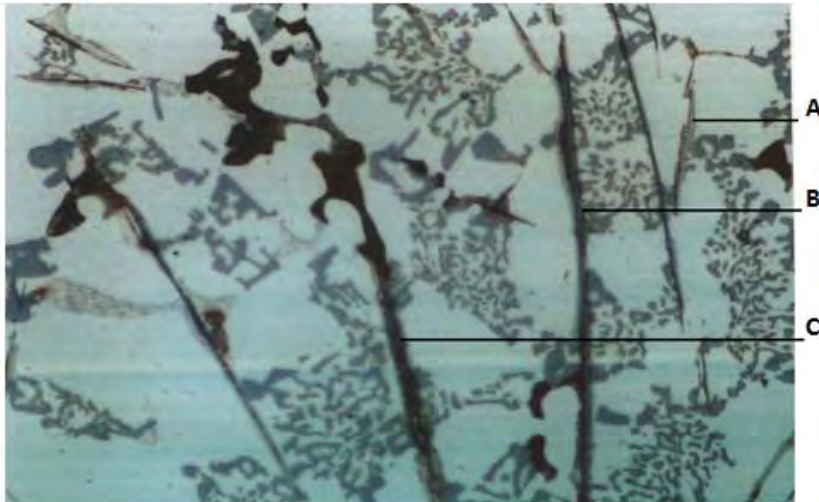


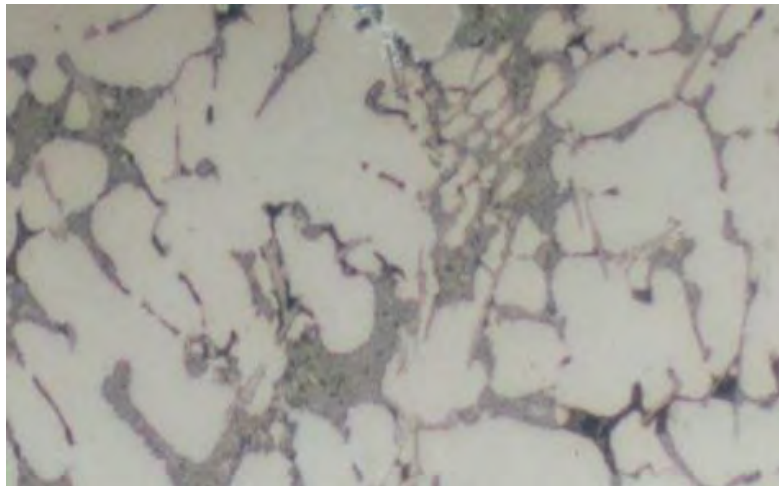
Figura 5.11.b. Ataque por 2 minutos 45 segundos. Aumento 1000X.



d.2.3) Ataque con ácido nítrico

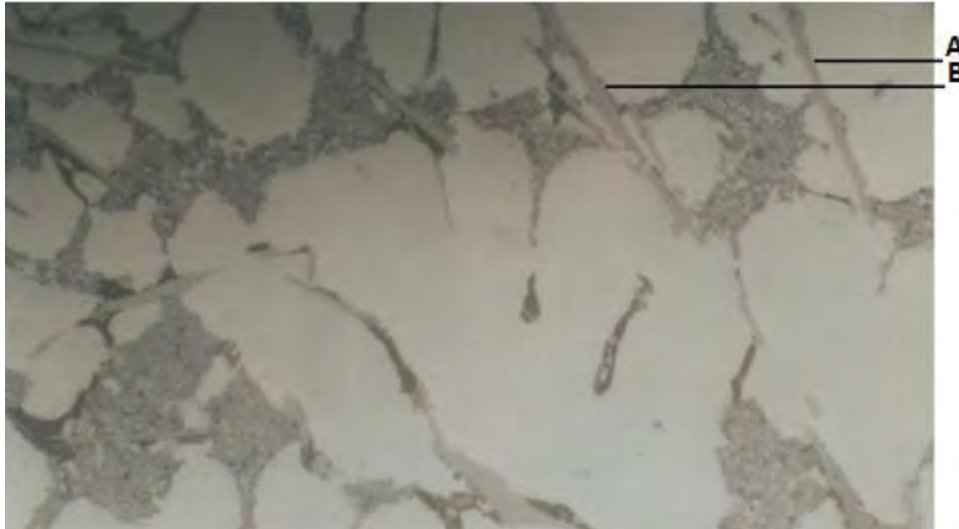
Se muestra en la figura 5.12.a. ataque por inmersión en solución a 70°C durante 60 segundos. Se puede observar que las fases alargadas son ligeramente atacadas, sólo delineándose. Entonces se puede decir, tomando como base las tablas 5.3.a. y 5.3.b., que esta fase es  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ .

Figura 5.12.a. Ataque durante 1 minuto 10 segundos. Aumento 200X.



La figura 5.12.b. también muestra el ataque por 1 minuto, pero en este caso se ven “blades” que no han sufrido cambio con el ataque, (A) y (B). Po lo que se trata del constituyente  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ .

Figura 5.12.b Ataque por 1 minuto. Aumento 1000X.



Los compuestos intermetálicos más relevantes son las diferentes fases de hierro, debido a su efecto sobre las propiedades mecánicas. Como hemos podido deducir de los ataques realizados, en nuestra aleación 319.2 existen los compuestos intermetálicos  $\beta$ - $\text{Al}_5\text{FeSi}$  (fase  $\beta$ ) y  $\text{Al}_3\text{Fe}$ , que son los más perjudiciales en estas aleaciones, debido a su forma de agujas, las cuales son duras y frágiles, y tienen escasa adhesión a la matriz por lo que la resistencia a la fractura disminuye.

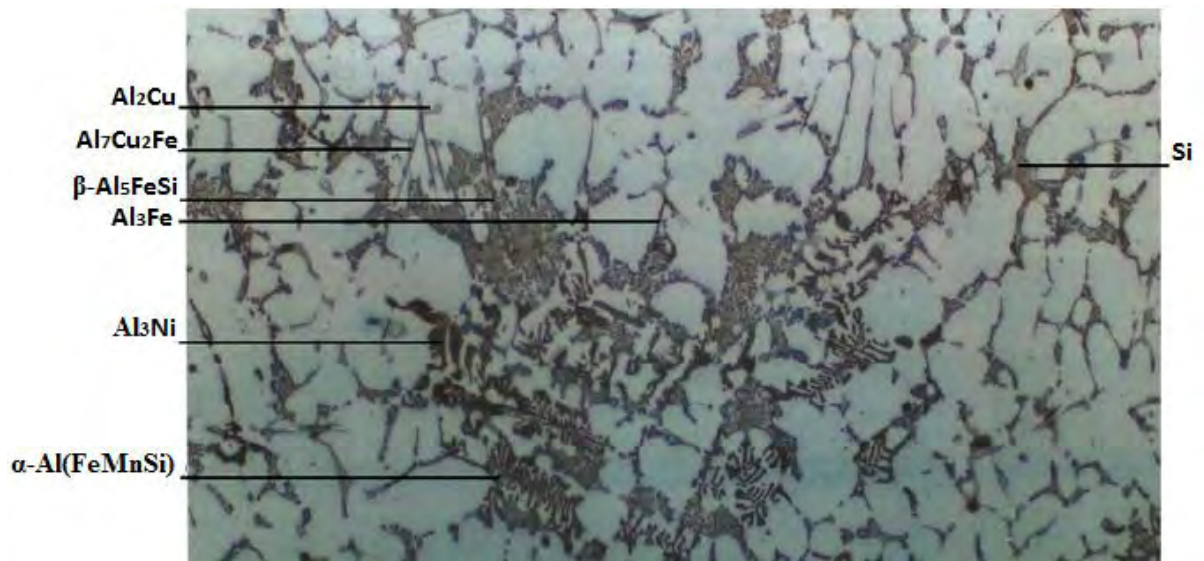
En esta aleación, la cantidad de hierro sobrepasa el 0.7 % en peso, lo que significa que estas fases de hierro crecen longitudinalmente y se vuelven más nocivas.

Por otro lado, esta aleación también contiene manganeso, lo que ayuda a disminuir la formación de la fase  $\beta$  no deseada, promoviendo la formación de la fase  $\alpha$ - $\text{Al}(\text{FeMn})\text{Si}$ , en forma de escritura china, lo que se confirma con el resultado obtenido de los ataques realizados.

A continuación, en la figura 5.13., se indican las fases que se han encontrado en la aleación 319.2, frente al ataque hecho con ácido fosfórico durante 2 minutos 45 segundos.

Aquí se observa, que la respuesta de las fases  $\beta$ - $\text{Al}_5\text{FeSi}$  y  $\text{Al}_3\text{Fe}$ , son muy similares, por lo que se recomienda atacar con ácido fluorhídrico para poder hacer un correcto reconocimiento de la fase  $\beta$ - $\text{Al}_5\text{FeSi}$ .

Figura 5.13. Ataque con ácido fosfórico, por 2 minutos 45 segundos. Aumento 100X.

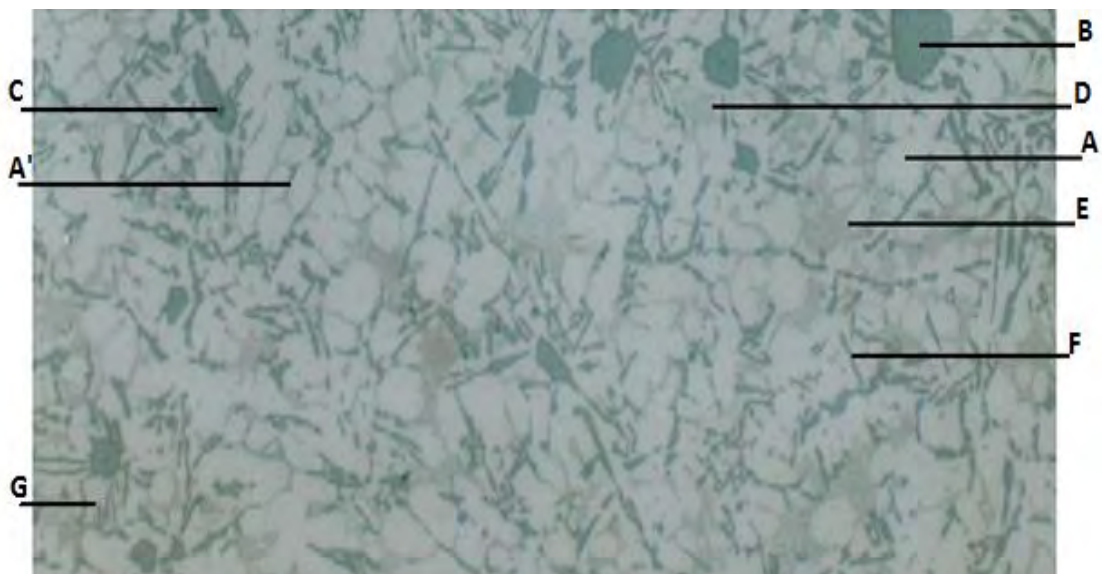


### 5.2.2 Estudio metalográfico de la aleación 384.2

#### a) Microestructura característica

A diferencia de la aleación 319.2 estudiada previamente, la microestructura en la aleación 384.2 y en este tipo de aleaciones, contiene grandes partículas de silicio primario (B y C) de forma angular y compleja, silicio eutéctico (G) que aparece en forma de agujas finas, en una matriz de solución sólida base aluminio (A) y (A'), partículas irregulares redondeadas, fases de tipo chinescas (D y E), fases alargadas (blades) (F).

Figura 5.14. Microestructura característica de la aleación 384. 2. Sin Ataque. Aumento 200 X.



**b) Constituyentes de formas redondeadas y placas irregulares.**

**b.1) Sin ataque**

En la figura 5.3.a., se muestran granos de forma poliédricas de un color gris (A) y (B), y también partículas irregulares redondeadas de un color gris pálido (C).

Figura 5.15.a. **Muestra sin ataque. Aumento 200X.**

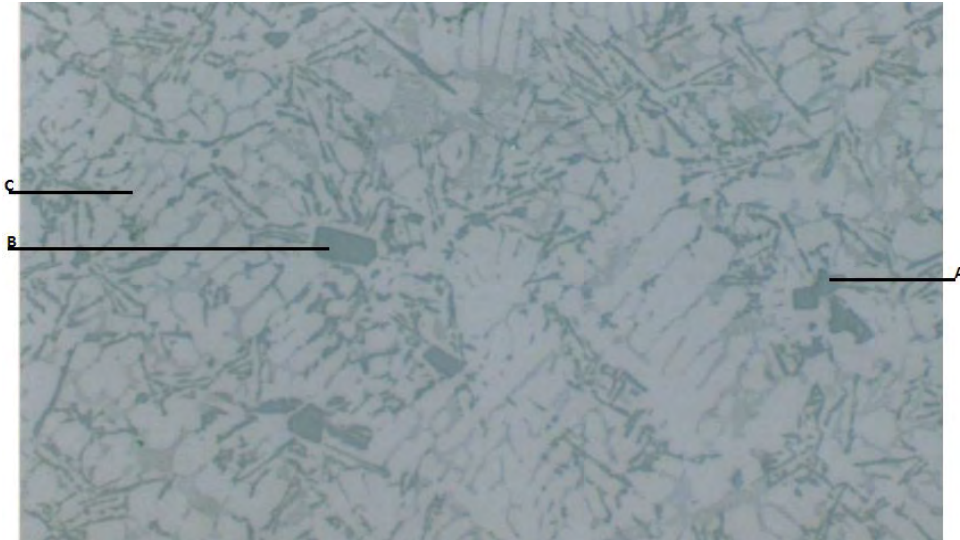
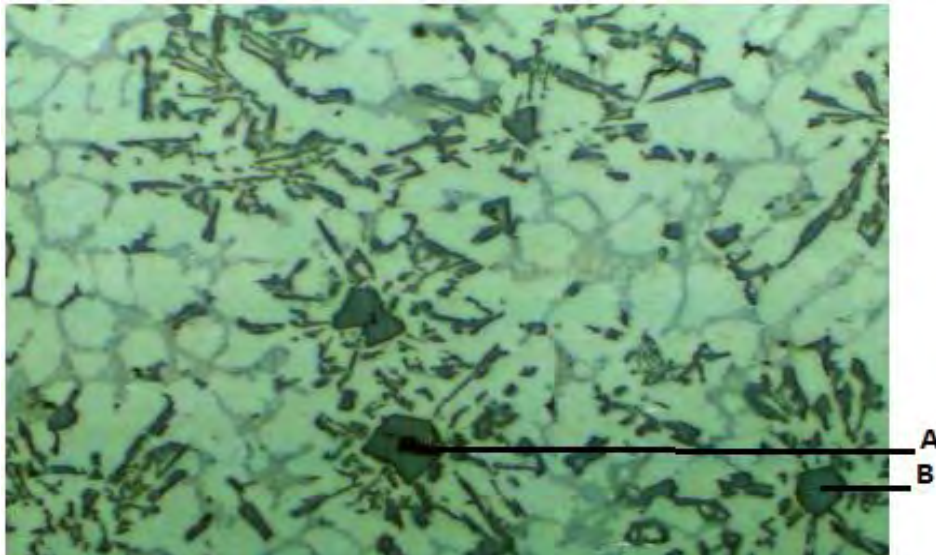


Figura 5.15.b. **Muestra sin ataque. Aumento 200X.**



Lo que se muestra en la figura 5.15.b. es la microestructura también sin ataque, pero cambiando la luz de fondo a una luz azul, lo que hace resaltar los colores naturales de las fases.

Ahora se ve que el color de las partículas poliédricas es de color gris azulado (B), y es así como se observa en el microscopio. En esta foto también podemos ver que sobre las

partículas poliédricas hay un constituyente negro, que según la bibliografía consultada<sup>78</sup>, se trata de la fase  $Mg_2Si$ .

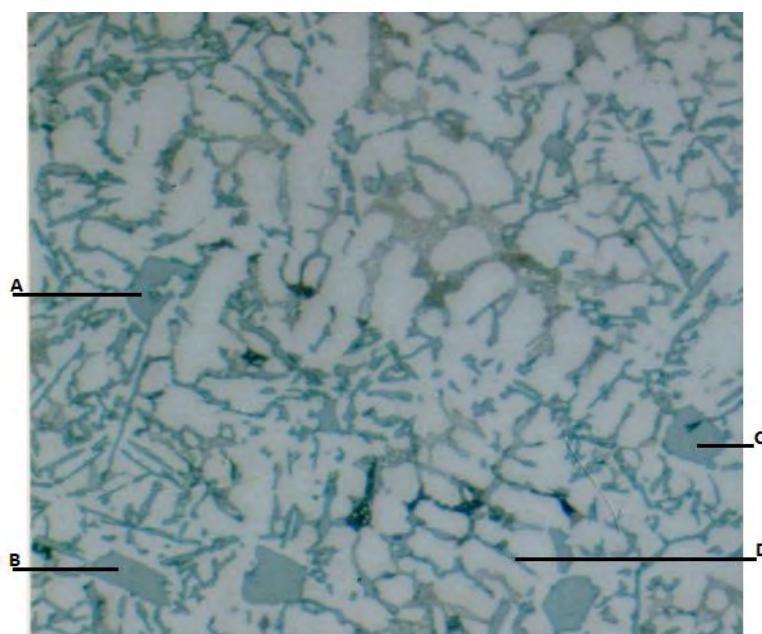
## b.2) Con ataque

### b.2.1) Ataque con HF

Ataque durante 30 segundos por inmersión. En la figura 5.16. se puede observar que los granos poliédricos no han cambiado de color con el ataque químico, por lo que se puede confirmar que se trata de silicio primario (A), (B) y (C), de acuerdo a la tabla 5.3.b.

Las partículas irregulares redondeadas (D), no son afectadas por el ataque, por lo que se puede decir que se trata del constituyente  $Al_2Cu$  o  $Al_2CuMg$ .

Figura 5.16. **Ataque con HF. Durante 30 segundos. Aumento 200 X.**

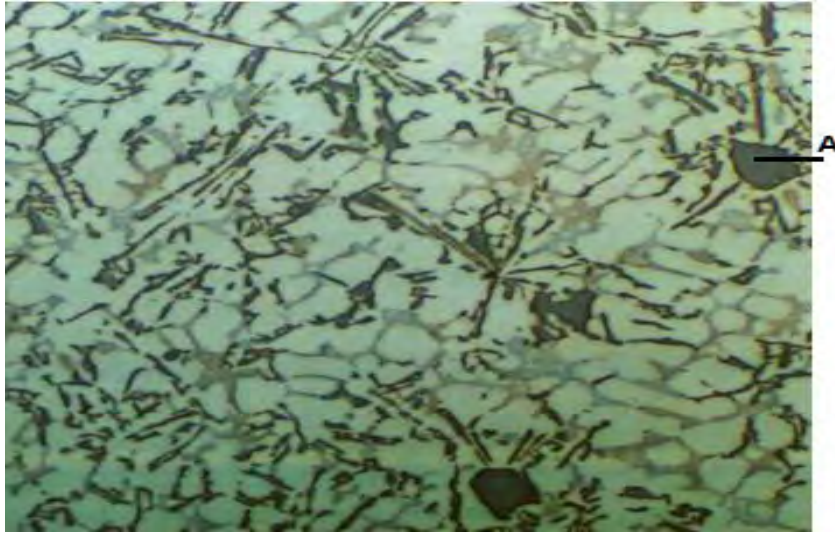


### b.2.2) Ataque con $H_3PO_4$

La micrografía de la figura 5.17.a ha sido tomada con luz de fondo azul y vemos el ataque hecho por inmersión durante 2 minutos a 50 °C. Con este tiempo no se logra tener un buen ataque, vemos que las partículas poliédricas (A), al igual que con el ataque de ácido fluorhídrico, no sufren cambio, es decir no son atacadas. Y en general toda la microestructura no sufre cambios visibles.

<sup>78</sup> ASM HANDBOOK – Metallography and Microstructures. Volume 9. [5].

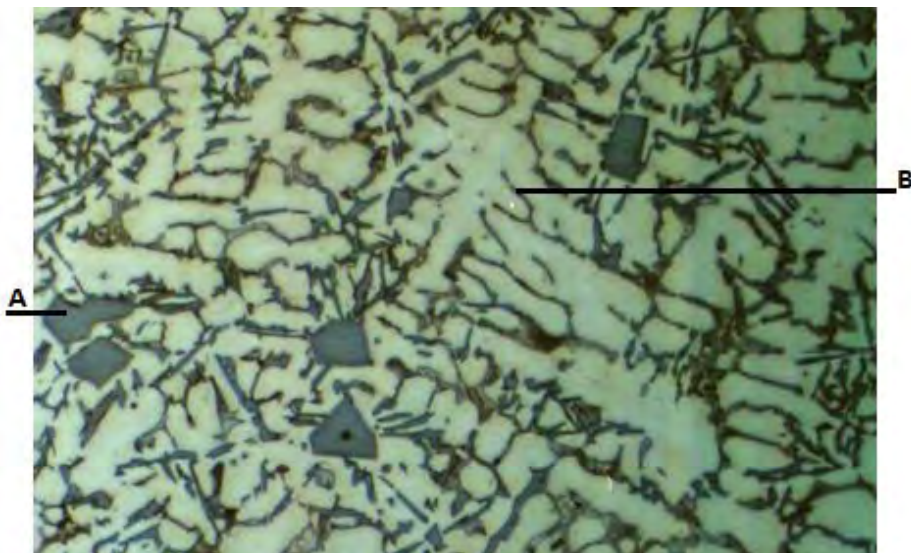
Figura 5.17.a. Ataque durante 2 minutos. Aumento 200 X.



En la figura 5.17.b, se muestra el ataque hecho por inmersión durante 3 minutos y medio a 50 °C. En este caso, ya se ha obtenido un buen ataque químico y, sin embargo se puede observar que las partículas poliédricas (A) no son atacadas. Con esto se puede afirmar una vez más que se trata de partículas de silicio primario.

Por otro lado, están las partículas irregulares redondeadas (B), que en este caso se ve que han sufrido cambio de color a marrón oscuro, es decir han sido atacadas por el ácido fosfórico. De acuerdo a la respuesta que ha tenido frente al ataque se puede decir que se trata de la fase  $Al_2CuMg$ .

Figura 5.17.b. Ataque durante 3 minutos y medio. Aumento 200X.

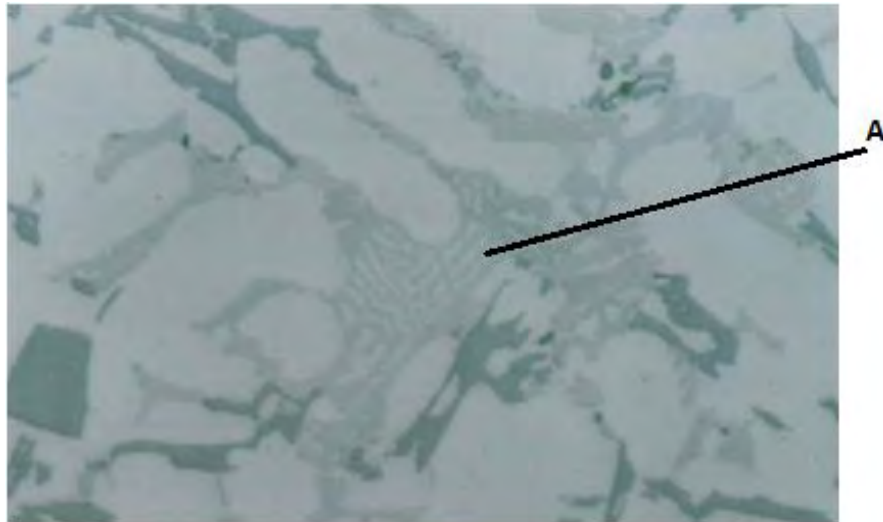


C) **Constituyentes del tipo chinescas o formas esqueléticas.**

C.1) Sin ataque

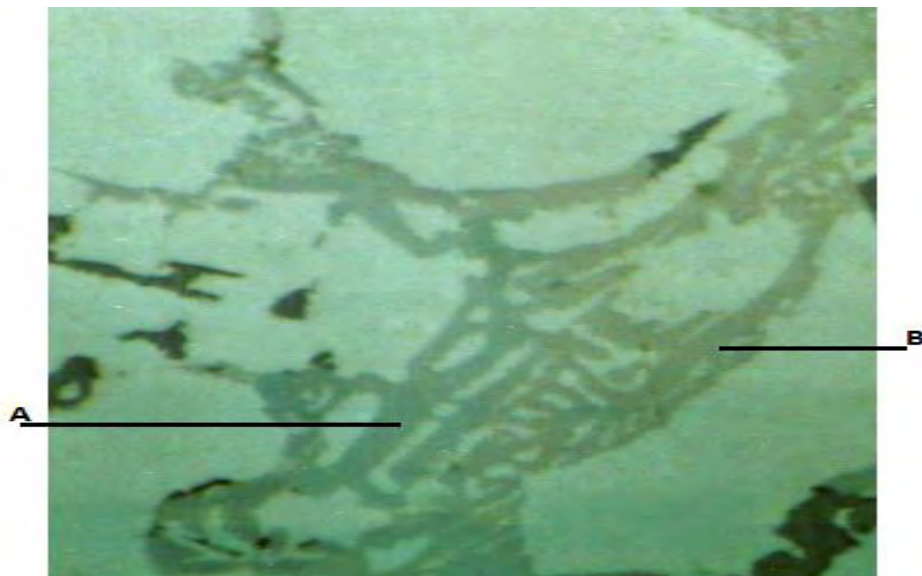
La figura 5.18.a. muestra un constituyente de forma esquelética de color gris metálico claro no delineado (A).

Figura 5.18.a. **Sin ataque. Aumento 200X.**



En la figura 5.18.b., también se muestra la microestructura sin ataque y se puede observar que hay dos fases esqueléticas una de color gris claro (A) y la otra de color gris amarillento (B).

Figura 5.18.b. **Sin ataque. Aumento 1000X.**



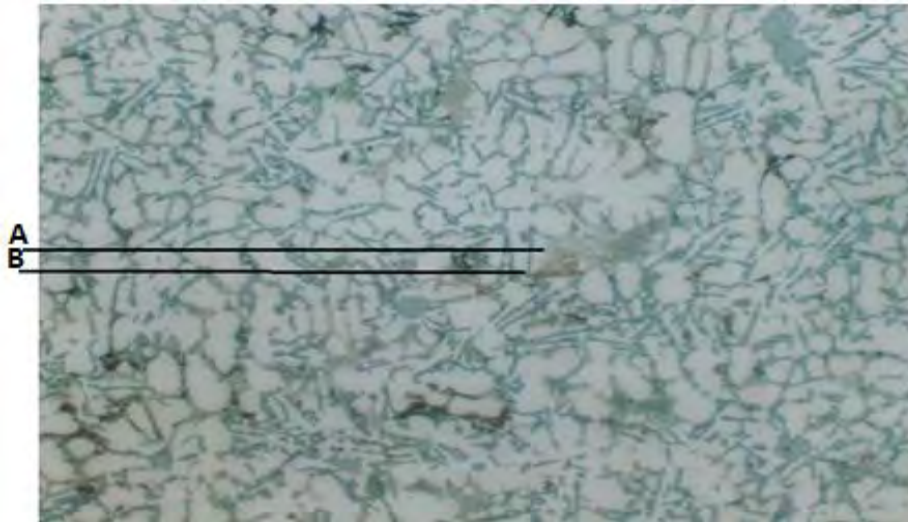


## C.2) Con ataque

### C.2.1) Ataque con HF

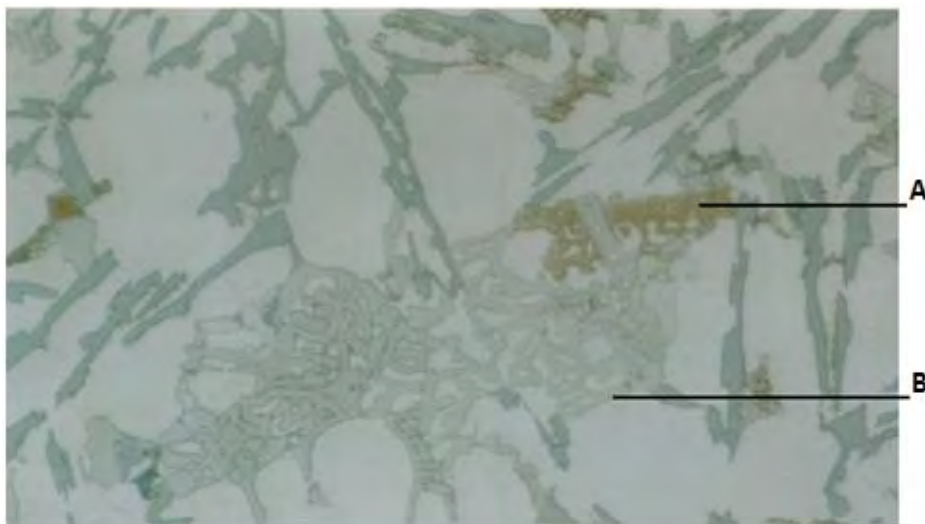
Ataque durante 30 segundos por inmersión. La figura 5.19.a. muestra constituyentes de color marrón claro (B) y de color gris metálico claro delineados (A).

Figura 5.19.a **Ataque durante 30 segundos. Aumento 200X.**



Ahora podemos ver en la figura 5.19.b una ampliación de la figura anterior, lo que sirve para visualizar correctamente los colores de las fases esqueléticas.

Figura 5.19.b. **Ataque durante 30 segundos. Aumento 1000X.**

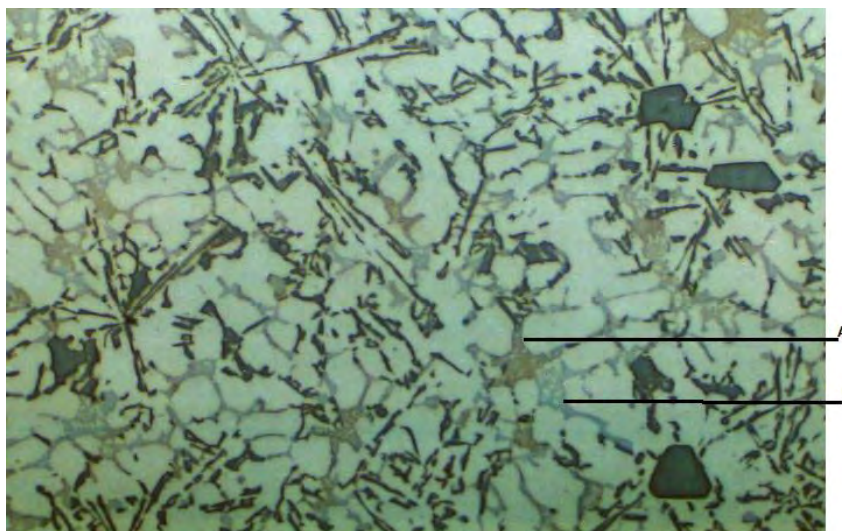


Con esta respuesta al ataque con ácido fluorhídrico, y apoyándonos en las tablas 5.3.a. y 5.3.b. se puede decir que la fase que se pintó de color marrón claro se trata de la fase  $\alpha$ -Al(FeMnSi), y con respecto a la fase gris clara delineada (B) puede ser  $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_2$ .

### C.2.2) Ataque con H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

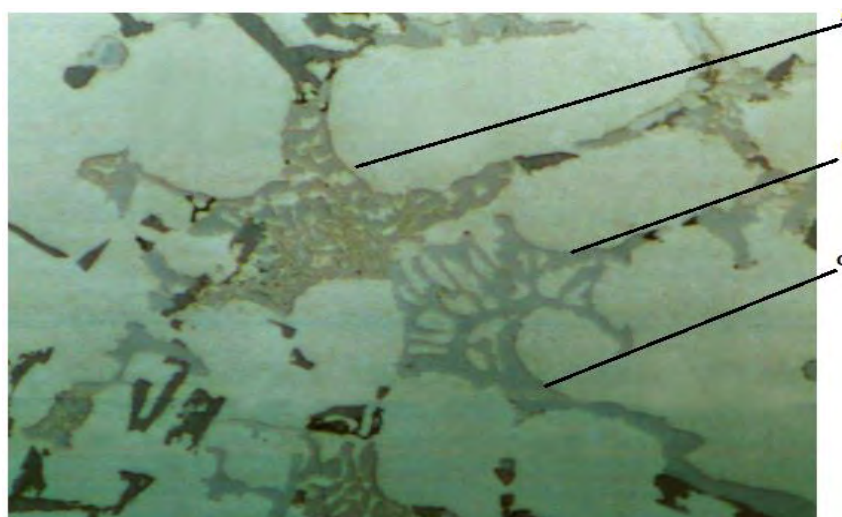
La figura 5.20.a. muestra el ataque hecho durante 2 minutos a 50°C; es un ataque leve pero se puede observar que hay fases chinecas que se han pintado de un color marrón claro (A) y otras fases chinecas que parece no haberles afectado el ataque (B).

Figura 5.20.a. **Ataque durante 2 minutos a 50 °C. Micrografía 200 X.**



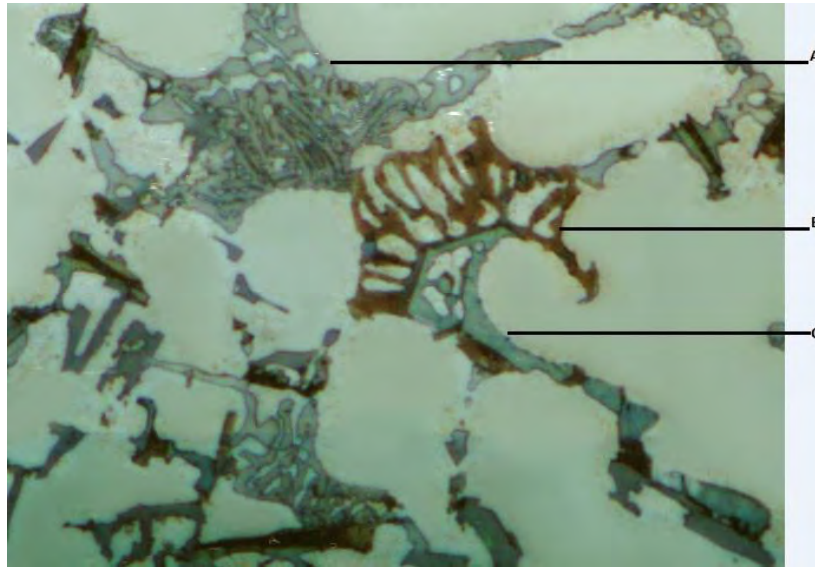
En la figura 5.20.b. se muestran a una mayor ampliación las fases, con ataque durante 2 minutos a 50°C, con este tiempo no se logra un buen ataque. También se ve que hay fases de forma laminares irregulares (C) de un color gris muy similar a la fase esquelética (B).

Figura 5.20.b. **Ataque durante 2 minutos a 50 °C. Micrografía 1000X.**



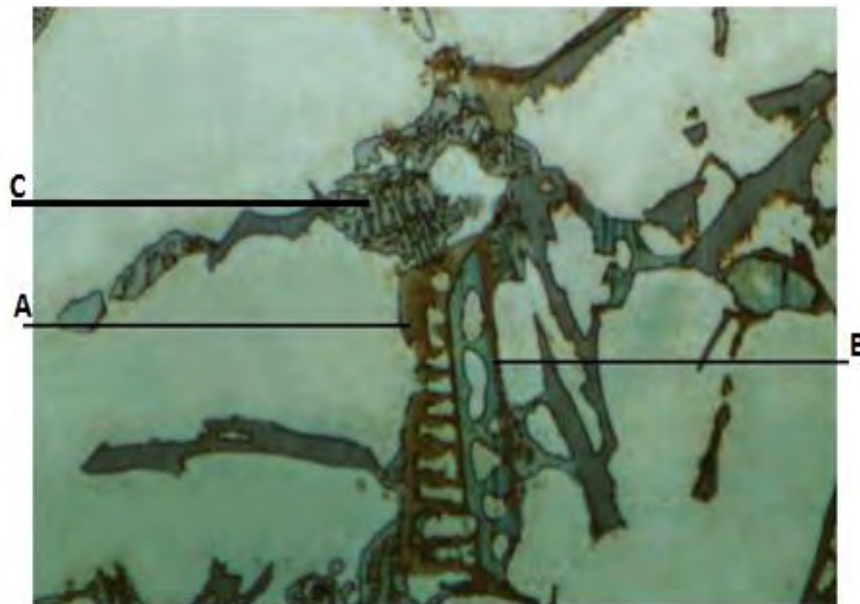
En la figura 5.20.c. se muestra la respuesta frente a un ataque de 4 minutos, y se puede observar claramente que ahora los colores se han intensificado. Se observan esqueléticas de color gris oscuro delineadas (A), esqueléticas de color marrón oscuro (B) y también vemos que hay fases de formas laminares irregulares, cambian a un color azul claro (C).

Figura 5.20.c. Ataque durante 4 minutos a 50°C. Micrografía a 1000X.



En esta Figura 5.20.d., se ven más fases de forma esqueléticas de color marrón (B) y la fase de forma laminar de color azul (C).

Figura 5.20.d. Ataque durante 4 minutos a 50°C. Micrografía a 1000X.



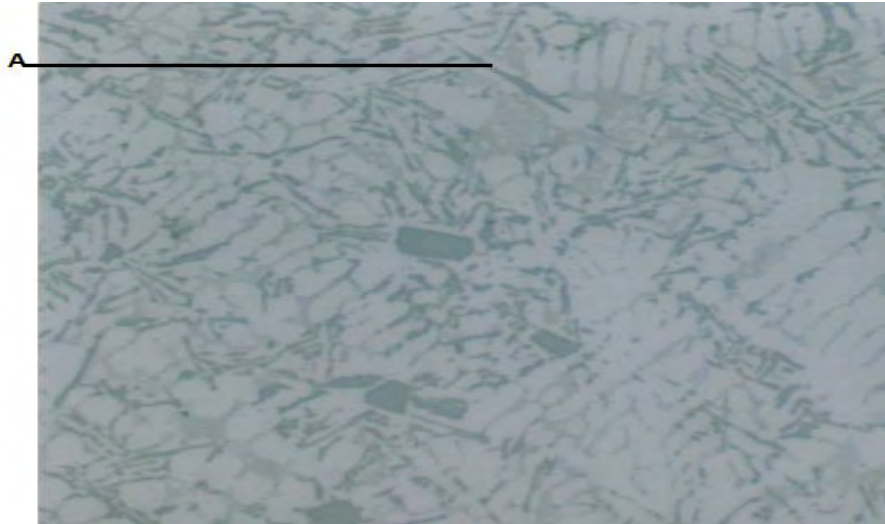
De acuerdo, a la respuesta que han tenido las fases chinescas o esqueléticas al ácido fosfórico y a las tablas de respuestas 5.3.a. y 5.3.b., se puede decir que la fase que cambió a color marrón oscuro (A) se trata de la fase  $\alpha$ -Al(FeMnSi), la fase que tuvo un ligero ataque y se delineó, se trata del constituyente  $Al_8Mg_3FeSi_2$ . Y la fase que cambió a color azul, en la figura 5.20.c se ven formas esqueléticas o placas irregulares (C) que puede ser el constituyente  $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ .

d) **Constituyente de formas alargadas (blades).**

d.1) Sin ataque

La micrografía que se muestra en la figura 5.21. ha sido tomada con luz de fondo blanca, y muestra el constituyente de forma alargada de color gris (A).

Figura 5.21. Sin ataque. Aumento 200X.

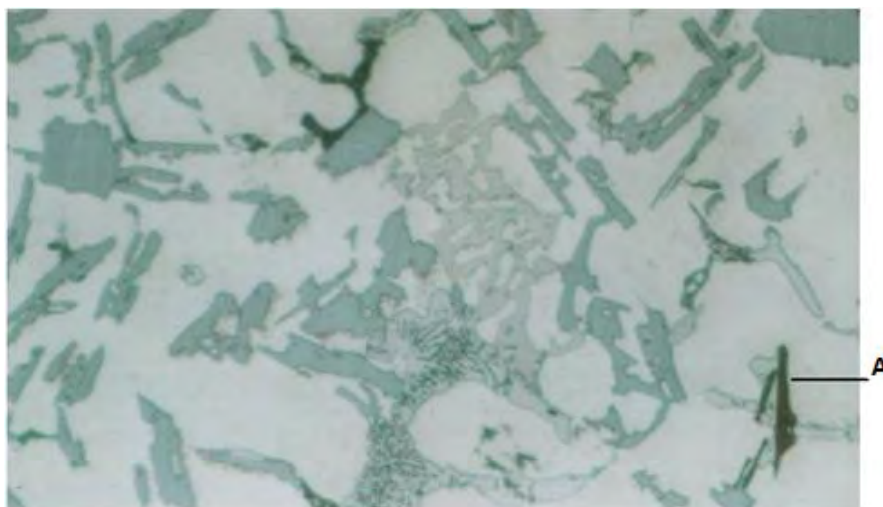


d.2) Con ataque

d.2.1) Ataque con HF

Se puede observar en la figura 5.22. que el constituyente en forma de aguja se mancha a color marrón oscuro (A). Entonces, se trata del constituyente  $\beta\text{-Al}_5\text{SiFe}$  o  $\text{Al}_3\text{Fe}$ .

Figura 5.22. Ataque durante 30 segundos. Aumento 1000X.



#### d.2.2) Ataque con $H_3PO_4$

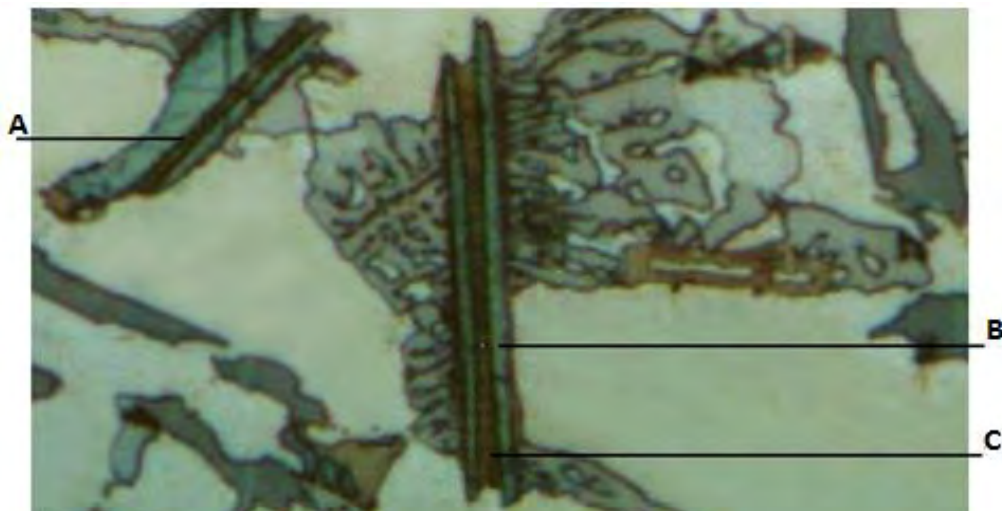
En la figura 5.23. se muestra el ataque por inmersión durante 3 minutos a 50 °C. En este caso vemos que tenemos dos tipos de fases de morfología alargada, una que pintó a color marrón (A) y (C), y la otra cambió a color azul (B), también se ve un constituyente de morfología laminar de color azul, que se trata del compuesto intermetálico  $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$

De acuerdo, a las tablas de respuesta 5.3.a. y 5.3.b., los constituyentes de color marrón (A) y (C) corresponden a la fase  $\beta-Al_5SiFe$ .

Para los “blades” de color azul, no se ha encontrado esta respuesta en la bibliografía consultada, pero es posible que se trate de la fase  $Al_7Cu_2Fe$ .

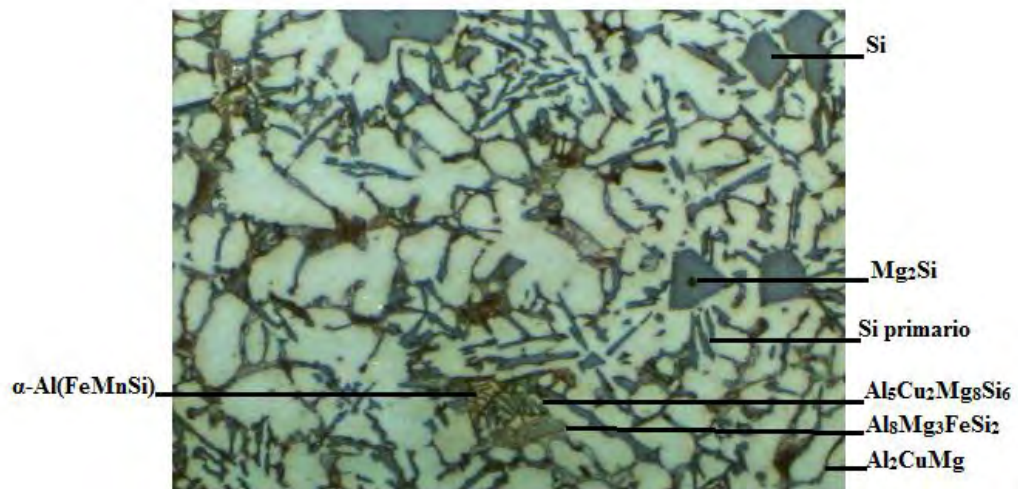
En la aleación 319. 2, este constituyente no se atacó con ácido fosfórico, porque fue un ataque durante 2 minutos 45 segundos, y puede ser que, con el ataque mayor durante 4 minutos haya cambiado a color azul claro.

Figura 5.23. **Ataque durante 4 minutos. Aumento 1000X.**



A continuación, en la figura 5.24. se muestran, las fases reconocidas en la aleación 384.2.

Figura 5.24. Ataque con ácido fosfórico. Por 4 minutos a 50 °C. Aumento 200X.



## Capítulo 6

### Conclusiones y recomendaciones

Las aleaciones de aluminio por su fácil deformabilidad, presentan algunas peculiaridades en los procesos de corte, desbaste y pulido que necesitan atenderse para llegar a un resultado óptimo.

#### **Peculiaridades que hay que tener en cuenta para desbaste y pulido:**

- 1) El aumento de temperatura que se produce al momento desbaste, exige, como es sabido el uso de un medio refrigerante, en el caso del aluminio se recomienda usar como lubricante glicerina.
- 2) Para el aluminio y sus aleaciones es necesario que el pulido final sea llevado hasta óxido de magnesio y no hasta el paño de 1  $\mu\text{m}$ , como es en el caso de otros metales, porque después del paño de 1  $\mu\text{m}$ , en el aluminio aún hay rayas visibles.
- 3) El óxido de magnesio, hay que mantenerlo en un recipiente hermético y lejos de la humedad, si no se hace esto, se van a formar grumos que dificultan, o incluso impiden, su absorción en el paño de pulido.
- 4) La conservación y limpieza del paño de pulido con óxido de magnesio, es sumamente importante, ya que si se deja al aire libre, se va a secar el óxido de magnesio en el paño y la superficie de este se va a endurecer. Lo que se recomienda es, lavar el paño con agua destilada para eliminar todos los residuos de óxido de magnesio, y luego dejarlo en un recipiente hermético.
- 5) En la preparación metalográfica es importante la presión y tiempo de desbaste, es por eso, que se debe hacer el desbaste con paradas intermedias, para así ir observando que las rayas hechas no sean profundas y gruesas. Para la preparación del aluminio es muy importante esto, porque si se llega a hacer una raya muy gruesa y profunda, se tiene que volver a empezar desde la lija #180.
- 6) No olvidar que el enjuague de la muestra se hace con agua destilada o desionizada. Si se usa agua del caño, los microbios y las sales que contiene ésta, causan dureza, y son culpables de las manchas al secado.

**Peculiaridades del ataque:**

- 7) Es recomendable para efectuar el ataque químico que, primero se ataque por el tiempo mínimo que se muestra en las tablas, y luego, si es necesario, ir incrementando el tiempo de ataque, para así evitar el sobreataque.
- 8) En el ataque químico para revelar la microestructura, otro punto importante es la preparación y conservación del reactivo de ataque, ya que si no se conserva en el envase adecuado éste pierde sus propiedades y no se conseguiría observar la microestructura de la aleación.
- 9) Los ácidos fluorhídrico, fosfórico y reactivo de Keller hay que conservarlos en envases o recipientes de plástico color oscuro, y el ácido nítrico, en recipiente de vidrio oscuro.
- 10) La eficacia de cada reactivo, va a depender de que se haya conservado en el envase adecuado y en el ambiente adecuado, y además que se utilice de acuerdo a lo indicado en las tablas de ataque, porque la temperatura, tiempo y forma de aplicación, van a depender del material que se esté estudiando.
- 11) Para las aleaciones de aluminio, la temperatura adecuada de cada reactivo de ataque son: ácido fluorhídrico y reactivo de Keller a temperatura ambiente 20-25 °C, ácido fosfórico a 50 °C, y ácido nítrico a 70 °C.
- 12) Se recomienda para la preparación de los reactivos químicos, hacerlo en un laboratorio que cuente con campana extractora de vapores y con los accesorios de protección, ya que los ácidos utilizados son muy peligrosos.

**Determinación de los constituyentes de la aleación 319.2:**

- 13) Los resultados del estudio metalográfico realizado a las aleaciones de aluminio Al-Si-Cu moldeadas, con el microscopio óptico, se caracterizan por una estructura dendrítica de solución sólida  $\alpha$  como matriz de la aleación.
- 14) Las micrografías demuestran que la aleación 319.2 presenta fases alargadas más grandes que la 384.2, lo que está de acuerdo con los estudios que indican que, a mayor cantidad de hierro, estas fases son más gruesas o de mayor tamaño. Hay que tener en cuenta además que, cuánto más grandes son éstas, son más perjudiciales para las propiedades mecánicas de la aleación.
- 15) La morfología de las fases con hierro, cuando hay manganeso y magnesio presentes aparecen como fases de escritura china.
- 16) De acuerdo a lo anterior, se puede ver claramente en las micrografías que en la aleación 319.2 hay mayor presencia de las fases tipo chinescas, debido a que hay mayor contenido de hierro y mayor contenido de manganeso.



- 17) El microscopio metalográfico utilizado no contaba con luz polarizada, lo que fue una limitación al momento de la identificación de fases. La luz polarizada, es un factor que se recomendaba en la diversa bibliografía consultada, para poder reconocer con mayor facilidad los constituyentes.
- 18) Las fases que se han podido reconocer para la aleación 319.2 son las siguientes:  $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,  $\alpha\text{-Al(FeMnSi)}$ ,  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ ,  $\text{Al}_3\text{Fe}$ ,  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ,  $\text{Al}_3\text{Ni}$ .
- 19) La fase  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , tuvo mejor ataque con el ácido nítrico durante 60 segundos a una temperatura de 70 °C.
- 20) El compuesto intermetálico  $\alpha\text{-Al(FeMnSi)}$ , tiene un mejor ataque con ácido fosfórico, atacado por inmersión a 50°C durante 2 minutos 45 segundos.
- 21) El compuesto intermetálico  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ , se logra identificar mejor con ácido fluorhídrico por inmersión durante 30 segundos, cambia a color marrón.
- 22) El ácido fosfórico ataca muy bien al constituyente  $\text{Al}_3\text{Fe}$ , por inmersión a 50°C, durante 2 minutos 45 segundos.
- 23) La fase  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ , de forma alargada, se pudo reconocer porque sufrió muy ligero ataque con ácido fosfórico, aplicado durante 2 minutos 45 segundos por inmersión a 50 °C.

#### **Determinación de los constituyentes de la aleación 384.2:**

- 24) Las fases que se han podido reconocer para la aleación 384.2 son las siguientes:  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ,  $\alpha\text{-Al(FeMnSi)}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_2$ ,  $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ ,  $\beta\text{-Al}_5\text{SiFe}$ , Si primario y partículas poliédricas de silicio.
- 25) El constituyente  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  se logra diferenciar de la fase  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , porque es atacado por ácido fosfórico, el color cambia a marrón oscuro. Para que sea visible el cambio, se necesita atacar durante 3 minutos y 30 segundos por inmersión a 50 °C.
- 26) La fase  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , fue de fácil identificación, porque aparece como inclusión, sobre las partículas de silicio poliédricas.
- 27) La fase china  $\alpha\text{-Al(FeMnSi)}$ , en esta aleación (384.2), se logra identificar mejor con ácido fosfórico, durante 4 minutos por inmersión a 50°C, el color cambia a marrón oscuro.
- 28) La respuesta al ataque que tuvo el constituyente  $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_2$ , fue de delinarse. El ataque se hizo con ácido fosfórico, durante 4 minutos por inmersión a 50°C.
- 29) El compuesto intermetálico  $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ , de forma de placas irregulares y esqueléticas, se pintó de un color azul claro, ante el ataque con ácido fosfórico durante 4 minutos por inmersión a 50°C.

- 30) La fase  $\beta$ -Al<sub>5</sub>SiFe, en forma de agujas, se atacó con ácido fosfórico durante 4 minutos por inmersión a 50°C y se pintó de color marrón.
- 31) Las partículas poliédricas de silicio y los “blades” o agujas de silicio primario, no son atacados por ninguno de los reactivos de ataque utilizados.
- 32) La identificación de fases por medio del análisis metalográfico es práctica y está al alcance de cualquier laboratorio de metalografía, sin embargo, no se recomienda utilizarla como un método determinístico ya que se puede caer en confusión debido a las diferentes respuestas al ataque químico que se encuentran en la diversa bibliografía.

#### **Recomendaciones para futuros trabajos metalográficos con aluminio:**

Con este trabajo se han logrado dominar las técnicas para preparación y ataque metalográfico de aleaciones de aluminio para moldeo, se recomienda aplicar esta experiencia en la caracterización metalográfica de aleaciones de aluminio con tratamiento térmico.

Se sugiere también, aplicar las técnicas de preparación y ataque electrolítico que facilitan el pulido de aleaciones blandas como las de aluminio.

## Bibliografía

- [1] José María Badía Pérez. (1981). Transformaciones estructurales de las aleaciones de aluminio de alta resistencia. Tesis Doctoral para la obtención del título de Doctor Ingeniero Aeronáutico. Universidad Politécnica de Madrid.
- [2] Sandra Milena Grandas Jerez, Lina Marcela Pérez Gallego (2010). Formulación de un plan de negocios para la creación de una empresa dedicada al procesamiento y reciclaje de escoria de metales no ferrosos. Proyecto de Grado.
- [3] Germán Ardila López. (2007). Optimización de la Resistencia a la fatiga de una estructura cerrada de aluminio mediante unión soldada. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [4] ASM Handbook, Décima Edición *Volume 9. Metallography and Microstructures*. ASM International p. 107-115 y p.711-751, 2004.
- [5] ASM Handbook, Novena Edición, *Volume 9. Metallography and Microstructures*. ASM International, p. 351-388 y p. 629-636, (1988).
- [6] ASM Metals Handbook, Décima Edición, *Volume 2. Properties and Selection: Nonferrous Alloy and Special – Purpose Materials*. ASM International. (1992).
- [7] [http://www.mici.gob.pa/imagenes/pdf/caso\\_aluminio\\_de\\_panama.pdf](http://www.mici.gob.pa/imagenes/pdf/caso_aluminio_de_panama.pdf) (Página WEB del Ministerio de Comercio e Industrias de la República de Panamá).
- [8] <http://www.world-aluminium.org> (Página WEB de IAI – *International Aluminium Institute*)
- [9] <http://www.alueurope.eu/> (Página WEB de *European Aluminium Association*)
- [10] Leonard Ernest Samuels. (2003). *Metallographic Polishing by Mechanical Methods*. 4ta Edición. ASM International.
- [11] Günter Petzow, (1999). *Metallographic Etching: Techniques for Metallography, ceramography, platography*. 2da. Edición. ASM International.

- [12] [www.mty.itesm.mx/dia/deptos/im/m00-861/Lecturas/LectP1M1](http://www.mty.itesm.mx/dia/deptos/im/m00-861/Lecturas/LectP1M1). (Página WEB del Tecnológico de Monterrey – Departamento de Ing. Mecánica).
- [13] [es.scribd.com/doc/15574856/Trabajo-Final-Aluminio-6061](https://es.scribd.com/doc/15574856/Trabajo-Final-Aluminio-6061). (Página WEB de Scribd).
- [14] Manuel Alejandro Arciniegas Giraldo. (2007). Plan Estratégico de Negocios para la creación de una Planta de Fundición de Aluminio. Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Mecánico. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [15] <http://www.quimica.es/enciclopedia/es/Aluminio/>. (Página WEB de Química.es)
- [16] <http://www.cintal.com.ve/aluminio/proceso/index.php>. (Página WEB del Centro de Innovación Tecnológica del Aluminio).
- [17] <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/21545-Alcast-la-nueva-aleacion-de-aluminio-para-la-industria-de-moldes.html>. (Página WEB de Interempresas)
- [18] Fernando Daniel Guzmán Montenegro, Gabriel Orlando Caiza Calderón. (2010). “Aseguramiento de la calidad en las fundiciones de aluminio, en base a los procedimientos de moldeo en el laboratorio de fundición de la facultad de mecánica”. Tesis de Grado para la obtención del Título de Ingeniero Industrial. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- [19] Informe Sectorial. Sector de la industria del Aluminio y sus manufacturas. Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio y Culto – Argentina. (2010).
- [20] [http://www.aluminio.org/files/taller\\_profesores.pdf](http://www.aluminio.org/files/taller_profesores.pdf) (Página WEB de la Asociación para el Reciclado de Productos de Aluminio).
- [21] [http://www.slideshare.net/\\_Yesid Tapiero Martínez](http://www.slideshare.net/_Yesid_Tapiero_Martinez). Producción y Refinación de Metales. Aluminio y Titanio.
- [22] Ricardo García Castañón. Aluminio y aleaciones de aluminio. Apuntes de Ciencia y Tecnología de Materiales. Universidad de Oviedo. Escuela Superior de la Marina Civil de Gijón.
- [23] [www.proambientalperu.com](http://www.proambientalperu.com). (Página WEB de Pro Ambiental – Perú S.A.C)
- [24] Jorge Eduardo Loayza Pérez. (2007). “Boletín Electrónico Informativo Sobre Productos y Residuos Químicos”. Facultad de Química e Ingeniería Química. Universidad Mayor de San Marcos.
- [25] Química Industrial Inorgánica (Página WEB de Slideshare. net)
- [26] [www.dgb.uanl.mx/1020146066/1020146066\\_02.pdf](http://www.dgb.uanl.mx/1020146066/1020146066_02.pdf) (Página Web de la Dirección General de Bibliotecas, Universidad Autónoma de Nuevo León).

- [27] *Aluminium: Properties and Physical Metallurgy*. American Society for Metals. Editado por John E. Hatch (2005).
- [28] Informe Mensual de Exportaciones Enero-Septiembre 2011. Prom Perú.
- [29] ASM Handbook, Décima Edición, *Volume 13. Corrosion*. ASM International. (1992).
- [30] ASM Handbook, Décima Edición, *Volume 15. Casting*. ASM International. (1992).
- [31] Rocío García García. Aleaciones de Aluminio. Revista Anual de divulgación científica SPIN CERO. (1999)
- [32] Cristian Vial. Apuntes del curso Metalurgia Física – ICM. Capítulo 1 – Solidificación. Pontificia Universidad Católica de Chile
- [33] María Angélica Alvarado Ramirez. Relación entre microestructura y propiedades mecánicas en piezas vaciadas de aluminio.
- [34] Victor Páramo López, (1998). Esferoidización del Eutéctico en las Aleaciones Aluminio Silicio. Para optar el Grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.
- [35] Jose Antonio Pero-Sanz Elorz. “Ciencia e ingeniería de materiales”. Cuarta Edición, Año 2000.
- [36] Dra. Rosalba Guerrero Aslla. La Solidificación. Introducción a la Ciencia de los Materiales – Capítulo 5. Universidad de Piura.
- [37] Belén Molina Sánchez. Diagrama de Equilibrio de Fases. Universidad Antonio de Nebrija.
- [38] José Iván Suárez Gutiérrez. (2011). Estudios de Deformación Cíclica en una Aleación Al-Si tipo A319. En opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales. Universidad Autónoma De Nuevo León.
- [39] Fernando Morales Rendón. Estudio de Adhesibilidad entre una aleación de aluminio A319.0 y una camisa de aluminio base Al-Si-Cu-Mg para aplicaciones automotrices. Dirección General de Bibliotecas. Universidad Autónoma de Nuevo León – México. (2003).
- [40] ASM Handbook, Décima Edición, *Volume 3. Alloy Phase Diagrams*. ASM International. (1992).
- [41] Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Microstructures of Mg-Al-Zn and Al-Si-Cu Cast Alloy. Volume 38, Issue 1. January 2010.

- [42] Salem Seifeddine. The Influence of Iron on the Microstructure and Mechanical Properties of Cast Al-Si Alloys. Jönköping University School of Engineering. Literature Review Vilmer Project-5.2 Casting. Diciembre 2007.
- [43] Informe Anual de Residuos Sólidos Municipales y No Municipales en el Perú, Gestión 2009. (Página WEB del Ministerio del Ambiente).
- [44] Importaciones y Exportaciones de Desperdicios y Desechos Ferrosos y No Ferrosos. Sección Comercio exterior – Informativo Vera Paredes.
- [45] [www.miyasato.com.pe](http://www.miyasato.com.pe). (Página WEB Corporación Miyasato).
- [46] [www.furukawa.com.pe](http://www.furukawa.com.pe). (Página WEB Corporación Furukawa).
- [47] [www.minem.gob.pe](http://www.minem.gob.pe). (Página WEB Ministerio de Energía y Minas).
- [48] Carlos A. Narváez, Diego Garzón, Carlos A. Bohórquez. (2009). Modelamiento del endurecimiento por precipitación en aleaciones de aluminio tratables térmicamente
- [49] ([upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2833/8/41774-8.pdf](http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2833/8/41774-8.pdf)). Estudio de la implantación de una unidad productiva dedicada a la fabricación de conjuntos soldados de aluminio.

### **Anexo 1: Terminología en inglés**

Aging	: Tratamiento térmico de envejecimiento
Etchant	: Solución química
Etching	: Ataque químico a la superficie
Eutectic Point	: Punto eutéctico
Final Polishing	: Pulido Final
Grain Boundary	: Límite de grano
Grinding	: Desbaste
Grit size	: Tamaño de las partículas de abrasivo
Intermetallic Compound	: Compuesto Intermetálico
Mounting	: Embutido de la muestra
Oxide Film	: Capa de óxido
Polishing	: Pulido mecánico, químico o electrolítico
Porosity	: Porosidad
Precipitate	: Precipitación

## **Anexo 2: Serie de Fuerzas Electromotrices**



Electrode reaction Standard potential at 25 °C (77 °F)	
$\text{Au}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Au}$	1.5
$\text{Pd}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Pd}$	0.987
$\text{Hg}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Hg}$	0.854
$\text{Ag}^+ + e^- \rightarrow \text{Ag}$	0.8
$2\text{Hg}^{2+} + 2e^- \rightarrow 2\text{Hg}$	0.789
$\text{Cu}^+ + e^- \rightarrow \text{Cu}$	0.521
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$	0.337
$2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2$	(Reference)
$\text{Pb}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Pb}$	-0.126
$\text{Sn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Sn}$	-0.136
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Ni}$	-0.25
$\text{Co}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Ni}$	-0.277
$\text{Tl}^+ + e^- \rightarrow \text{Tl}$	-0.336
$\text{In}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{In}$	-0.342
$\text{Cd}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cd}$	-0.403
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Fe}$	-0.44
$\text{Ga}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Ga}$	-0.53
$\text{Cr}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Cr}$	-0.74
$\text{Cr}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cr}$	-0.91
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Zn}$	-0.763
$\text{Mn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Mn}$	-1.18
$\text{Zr}^{4+} + 4e^- \rightarrow \text{Zr}$	-1.53
$\text{Ti}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Ti}$	-1.63
$\text{Al}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Al}$	-1.66
$\text{Hf}^{4+} + 4e^- \rightarrow \text{Hf}$	-1.7
$\text{U}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{U}$	-1.8
$\text{Be}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Be}$	-1.85
$\text{Mg}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Mg}$	-2.37
$\text{Na}^+ + e^- \rightarrow \text{Na}$	-2.71
$\text{Ca}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Ca}$	-2.87
$\text{K}^+ + e^- \rightarrow \text{K}$	-2.93
$\text{Li}^+ + e^- \rightarrow \text{Li}$	-3.05

### **Anexo 3: Tablas de composición de las aleaciones de aluminio**

Grade designation			Product <sup>(c)</sup>	Composition, wt%												
Aluminum Association <sup>(a)</sup>	UNS. No.	ISO <sup>(b)</sup>		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sn	Ti	Unspecified other elements		Al, min <sup>(d)</sup>
														Each	Total	
A305.0	A13050	...	S, P	4.5-5.5	0.20	1.0-1.5	0.10	0.10	...	...	0.10	...	0.20	0.05	0.15	rem
A305.1	A13051	...	Ingot	4.5-5.5	0.15	1.0-1.5	0.10	0.10	...	...	0.10	...	0.20	0.05	0.15	rem
A305.2	A13052	...	Ingot	4.5-5.5	0.13	1.0-1.5	0.05	...	...	...	0.05	...	0.20	0.05	0.15	rem
308.0	A03080	...	S, P	5.0-6.0	1.0	4.0-5.0	0.50	0.10	...	...	1.0	...	0.25	...	0.50	rem
308.1	A03081	...	Ingot	5.0-6.0	0.8	4.0-5.0	0.50	0.10	...	...	1.0	...	0.25	...	0.50	rem
308.2	A03082	...	Ingot	5.0-6.0	0.8	4.0-5.0	0.30	0.10	...	...	0.50	...	0.20	...	0.50	rem
319.0	A03190	3522 AlSi5Cu3 3522 AlSi5Cu3Mn 3522 AlSi6Cu4 3522 AlSi6Cu4Mn R164 AlSi5Cu3 R164 AlSi5Cu3Fe R164 AlSi6Cu4	S, P	5.5-6.5	1.0	3.0-4.0	0.50	0.10	...	0.35	1.0	...	0.25	...	0.50	rem
319.1	A03191	...	Ingot	5.5-6.5	0.8	3.0-4.0	0.50	0.10	...	0.35	1.0	...	0.25	...	0.50	rem
319.2	A03192	...	Ingot	5.5-6.5	0.6	3.0-4.0	0.10	0.10	...	0.10	0.10	...	0.20	...	0.20	rem

Grade designation			Product <sup>(c)</sup>	Composition, wt%												
Aluminum Association <sup>(a)</sup>	UNS. No.	ISO <sup>(b)</sup>		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sn	Ti	Unspecified other elements		Al, min <sup>(d)</sup>
														Each	Total	
383.2	A03832	...	Ingot	9.5-11.5	0.6-1.0	2.0-3.0	0.10	0.10	...	0.10	0.10	0.10	...	...	0.20	rem
384.0	A03840	...	D	10.5-12.0	1.3	3.0-4.5	0.50	0.10	...	0.50	3.0	0.35	...	...	0.50	rem
384.1	A03841	...	Ingot	10.5-12.0	1.0	3.0-4.5	0.50	0.10	...	0.50	2.9	0.35	...	...	0.50	rem
384.2	A03842	...	Ingot	10.5-12.0	0.6-1.0	3.0-4.5	0.10	0.10	...	0.10	0.10	0.10	...	...	0.20	rem
A384.0	A13840	...	D	10.5-12.0	1.3	3.0-4.5	0.50	0.10	...	0.50	1.0	0.35	...	...	0.50	rem
A384.1	A13841	...	Ingot	10.5-12.0	1.0	3.0-4.5	0.50	0.10	...	0.50	0.9	0.35	...	...	0.50	rem
385.0	A03850	...	D	11.0-13.0	2.0	2.0-4.0	0.50	0.30	...	0.50	3.0	0.30	...	...	0.50	rem
385.1	A03851	...	Ingot	11.0-13.0	1.1	2.0-4.0	0.50	0.30	...	0.50	2.9	0.30	...	...	0.50	rem
390.0	A03900	...	D	16.0-	1.3	4.0-5.0	0.10	0.45-	...	...	0.10	...	0.20	0.10	0.20	rem