



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## Efecto del cambio de la temperatura de homogenización en el comportamiento mecánico de la aleación de aluminio AA8011

**Autores:**

Briceño Jesús.  
Delgado Adolfo.

Naguanagua, Noviembre del 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## Efecto del cambio de la temperatura de homogenización en el comportamiento mecánico de la aleación de aluminio AA8011

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de  
Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

**Tutor:**  
*Ing. Gennifer Aparicio*

**Autores:**  
Briceño Jesús.  
Delgado Adolfo.

Naguanagua, Noviembre del 2009

# Resumen

---

El presente trabajo tiene por objeto evaluar el efecto del cambio en la temperatura de homogenización en el comportamiento mecánico de la aleación de aluminio AA8011. El desarrollo de este estudio se llevó a cabo a partir de láminas de la aleación AA8011 de 6 mm de espesor, proveniente de un proceso de colada continua. El material fue evaluado partiendo del estado de entrega y laminado a 50% de trabajo en frío, procediendo a la fabricación de las muestras para el ensayo de tracción. Estas muestras fueron sometidas a un tratamiento térmico de homogenizado a temperaturas de 600°C, 550°C y 450°C por un periodo de 16 horas, dependiendo de la condición en estudio. Un total de siete (7) condiciones fueron establecidas para el estudio de los ensayos de tracción, evaluación de dureza, análisis de la microestructura y superficie de fractura, incluyendo el material en estado de entrega para así establecer la condición inicial del material. Después de realizado estos ensayos y evaluaciones al material se discutieron los resultados, obteniéndose que:

Al tratar térmicamente el material a distintas temperaturas (600, 550, y 450°C) durante 16 horas, se obtuvieron variaciones poco relevantes de las propiedades mecánicas del material, solo se observó una disminución en ellas, con respecto a la muestra en estado original.

Al apreciar las fotografías de la microestructura del material expuesto a 600°C, se obtuvo una recuperación completa de su estructura, presentando granos equiaxiales dispuestos en gran espacio de las secciones estudiadas.

Se logró evidenciar que no es posible disminuir la temperatura de homogenización de la aleación de aluminio AA8011, debido básicamente a que no se presentó una recuperación completa de su estructura al reducir la temperatura del tratamiento.

# Glosario de términos

---

*S*: Esfuerzo aplicado  
*S<sub>u</sub>*: Esfuerzo último  
*S<sub>r</sub>*: Esfuerzo de ruptura  
*S<sub>0,2%</sub>*: Esfuerzo de fluencia  
*%RA*: Porcentaje de reducción de área  
*elong (%)*: Porcentaje de elongación  
*Si*: Silicio  
*Cu*: Cobre  
*Fe*: Hierro  
*Al*: Aluminio  
*Mn*: Manganeso  
*Mg*: Magnesio  
*Cr*: Cromo  
*Zn*: Zinc  
*Ti*: Titanio  
*°C*: Grados Celsius  
*HBN*: Hardness Brinell Number  
*L<sub>o</sub>*: Longitud inicial  
*L<sub>f</sub>*: Longitud final  
*°K*: Grados Kelvin  
*A<sub>o</sub>*: Área inicial  
*A<sub>f</sub>*: Área final  
*P*: Carga

## **Indice General**

<i>Introducción</i> .....	11
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	13
<b>1.1 Situación problemática</b> .....	13
<b>1.2 Objetivos</b> .....	14
1.2.1 Objetivo General.....	14
1.2.2 Objetivos Específicos.....	14
<b>1.3 Justificación</b> .....	15
<b>1.4 Alcance</b> .....	16
<b>1.5 Limitaciones</b> .....	17
<b>1.6 Antecedentes</b> .....	17
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	21
<b>2.1 Aluminio</b> .....	21
<b>2.2 Producción del aluminio</b> .....	21
<b>2.3 Sistemas de aleaciones de aluminio</b> .....	22
2.3.1 Generalidades.....	22
2.3.2 Especificaciones normativas .....	23
<b>2.4 Aleación de aluminio AA8011</b> .....	23
<b>2.5 Producción de la aleación AA8011</b> .....	25
<b>2.6 Efectos de los principales componentes de la aleación AA8011 sobre sus propiedades</b> .....	26
<b>2.7 Homogenización</b> .....	26
2.7.1 Generalidades.....	26
2.7.2 Efectos de la Homogenización sobre aleaciones comerciales de aluminio provenientes de colada continua.....	27
<b>2.8 Recristalización</b> .....	28
<b>2.9 Ensayos Mecánicos</b> .....	29
2.9.1 Ensayo de tracción .....	29
2.9.2 Ensayo de dureza .....	32
2.9.3 Microscopía óptica .....	33
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	36
<b>3.1 Desarrollo experimental</b> .....	36
<b>3.2 Descripción del material</b> .....	37

<b>3.3 Condiciones de trabajo</b> .....	38
<b>3.4 Laminación en frío</b> .....	38
<b>3.5 Tratamiento térmico de homogenización</b> .....	39
<b>3.6 Ensayo de tracción</b> .....	40
<b>3.7 Ensayo de dureza</b> .....	42
<b>3.8 Microscopia óptica</b> .....	43
<b>3.9 Fractografía</b> .....	45
<b>3.10 Lista de equipos utilizados</b> .....	46
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	48
<b>4.1 Caracterización del material</b> .....	48
<b>4.2 Ensayo de tracción</b> .....	48
<b>4.3 Ensayo de Dureza</b> .....	54
<b>4.4 Microscopia Óptica</b> .....	55
<b>4.5 Fractografía</b> .....	59
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	61
<b>5.1 Ensayo de Tracción</b> .....	61
5.1.1 Material en estado de entrega.....	61
5.1.2 Material homogenizado a 600°C.....	61
5.1.3 Material homogenizado a 550°C.....	62
5.1.4 Material homogenizado a 450°C.....	63
5.1.5 Comparación de las muestras sometidas a tratamiento térmico a las diferentes temperaturas (600°C, 550°C y 450°C).....	63
<b>5.2 Ensayo de Dureza</b> .....	65
<b>5.3 Microscopia Óptica</b> .....	66
5.3.1 Caracterización del material en condición original.....	66
5.3.2 Material en estado de entrega homogenizado a 600°C.....	66
5.3.3 Material homogenizado a 600°C, con 50% de trabajo en frío .....	67
5.3.4 Material en estado de entrega homogenizado a 550°C.....	67
5.3.5 Material homogenizado a 550°C, con 50% de trabajo en frío .....	68
5.3.6 Material en estado de entrega homogenizado a 450°C,.....	68
5.3.7 Material homogenizado a 450°C, con 50% de trabajo en frío .....	68
5.3.8 Comparación general de la microestructura de las distintas condiciones de trabajo.....	69

<b>5.4 Fractografía</b> .....	70
<b>5.5 Relación de las propiedades mecánicas con los distintos estudios realizados a las muestras.</b> .....	71
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	74
<b>Conclusiones</b> .....	74
<b>Recomendaciones</b> .....	76
<i>Referencias</i> .....	77

## ***Indice de tablas***

<b>Tabla 2.1</b> Designación de grupos de aleaciones. Fuente: King (1992).....	23
<b>Tabla 2.2</b> Composición química de la aleación AA8011. Fuente: aluminum association (2006). .....	24
<b>Tabla 2.3</b> Reactivos utilizados en ataque de las muestras micrográficas. Fuente: Metals Handbook (1948). .....	34
<b>Continuación. Tabla 2.3</b> Reactivos utilizados en el ataque de las muestras micrográficas. Fuente: Metals Handbook (1948) .....	35
<b>Tabla 3.1</b> Condiciones de trabajo.....	38
<b>Tabla 3.2</b> Nomenclatura de las muestras.....	41
<b>Tabla 4.1</b> Composición química de la muestra.....	48
<b>Tabla 4.2</b> Propiedades mecánicas obtenidas mediante el ensayo de tracción a muestras en condición original sin trabajo en frío, espesor 6 mm.....	49
<b>Tabla 4.3</b> Propiedades mecánicas obtenidas mediante el ensayo de tracción a muestras tratadas térmicamente, T=600°C y espesor de 6mm .....	49
<b>Tabla 4.4</b> Propiedades mecánicas obtenidas mediante el ensayo de tracción a muestras tratadas térmicamente, T=600°C y espesor de 3mm .....	50
<b>Tabla 4.5</b> Propiedades mecánicas obtenidas mediante el ensayo de tracción a muestras tratadas térmicamente, T=550°C y espesor de 6mm .....	51
<b>Tabla 4.6</b> Propiedades mecánicas obtenidas mediante el ensayo de tracción a muestras tratadas térmicamente, T=550°C y un espesor de 3mm.....	51
<b>Tabla 4.7</b> Propiedades mecánicas obtenidas mediante el ensayo de tracción a muestras tratadas térmicamente, T=450°C y un espesor de 6mm .....	52
<b>Tabla 4.8</b> Propiedades mecánicas obtenidas mediante el ensayo de tracción a muestras tratadas térmicamente, T=450°C y un espesor de 3mm.....	53
<b>Tabla 4.9</b> Promedio de las propiedades mecánicas de las condiciones en estudio .....	53
<b>Tabla 4.10</b> Dureza de las muestras en las distintas condiciones de estudio.....	54
<b>Tabla 4.11</b> Dureza promedio por condición de estudio.....	55

## ***Indice de figuras***

<b>Figura 2.1</b> Diagrama ternario de la fase liquida de Al-Fe-Si. Fuente: Metals HandBook (1992).....	24
<b>Figura 2.2</b> Diagrama tensiones-alargamiento.....	32
<b>Figura 3.2</b> Laminador en frío.....	39
<b>Figura 3.3</b> Horno Furnace .....	40
<b>Figura 3.4</b> Probeta tipo sheet .....	40
<b>Figura 3.5</b> Leyenda utilizada para la diferenciación las probetas.....	41
<b>Figura 3.6</b> Máquina universal GALDABINI para ensayo de tracción .....	41
<b>Figura 3.7</b> Durómetro Brinell.....	43
<b>Figura 3.8</b> Disposición de las zonas extraídas para el estudio de microscopía. ...	43
<b>Figura 3.9</b> Microscopio óptico.....	45
<b>Figura 3.10</b> Microscopio electrónico de barrido.....	46
<b>Figura 4.1</b> Curvas de esfuerzo vs. deformación en condición original ensayadas a tracción.....	49
<b>Figura 4.2</b> Curvas de esfuerzo vs. deformación de las muestras tratadas térmicamente a 600°C y con espesor de 6mm, ensayadas a tracción.....	50
<b>Figura 4.3</b> Curvas de esfuerzo vs. deformación de las probetas tratadas térmicamente a 600°C y con espesor de 3mm, ensayadas a tracción.....	50
<b>Figura 4.4</b> Curvas de esfuerzo vs. deformación de las muestras tratadas térmicamente a 550°C y con espesor de 6mm, ensayadas a tracción.....	51
<b>Figura 4.5</b> Curvas de esfuerzo vs. deformación de las probetas tratadas térmicamente a 550°C y con espesor de 3mm, ensayadas a tracción.....	52
<b>Figura 4.6</b> Curvas de esfuerzo vs. deformación de las muestras tratadas térmicamente a 450°C y con espesor de 6mm, ensayadas a tracción.....	52
<b>Figura 4.7</b> Curvas de esfuerzo vs. deformación de las muestras tratadas térmicamente a 450°C y con espesor de 3mm, ensayadas a tracción.....	53
<b>Figura 4.8</b> Curvas comparativa de esfuerzo vs deformación de las muestras, ensayadas a tracción. ....	54
<b>Figura 4.9</b> Grafica demostrativa de los promedios de dureza por condición, y curva de tendencia de las condiciones tratada térmicamente.....	55
<b>Figura 4.10</b> Microestructura de la muestra en estado original a 100X.....	56
<b>Figura 4.11</b> Microestructura de la muestra tratada a 600°C sin trabajo en frío a 100X.....	57

<b>Figura 4.12</b> Microestructura de la muestra tratada térmicamente a 600°C trabajada en frío a 100X.....	57
<b>Figura 4.13</b> Microestructura de la muestra tratada a 550°C sin trabajo en frío a 100X.....	58
<b>Figura 4.14</b> Microestructura de la muestra tratada térmicamente a 550°C y trabajada en frío a 100X.....	58
<b>Figura 4.15</b> Microestructura de la muestra tratada térmicamente a 450°C sin trabajo en frío a 100X .....	59
<b>Figura 4.16</b> Microestructura de la muestra tratada térmicamente a 450°C y trabajada en frío a 100X.....	59
<b>Figura 4.17</b> superficie de fractura de la muestra en estado de entrega .....	60
<b>Figura 4.18</b> Superficie de fractura de las muestras tratadas térmicamente a 600°C .....	60
<b>Figura 4.19</b> Superficie de fractura de las muestras tratadas térmicamente a 550°C .....	60
<b>Figura 4.20</b> Superficie de fractura de las muestras tratadas térmicamente a 450°C .....	60
<b>Figura 5.1</b> Comportamiento del esfuerzo de fluencia para las distintas condiones de estudio .....	64
<b>Figura 5.2</b> Comportamiento del esfuerzo último para las distintas condiciones de estudio .....	65
<b>Figura 5.3</b> Comportamiento del esfuerzo de ruptura para las distintas condiciones de estudio .....	65

# *Introducción*

---

---

Hoy en día el aluminio ocupa un lugar importante en el ámbito industrial, comercial e investigativo, ya que es uno de los metales dúctiles de extensa aplicabilidad, motivado a las características especiales que posee como son bajo peso, alta ductilidad, buena maleabilidad, resistencia a la corrosión, entre otros; es por ello que el empleo del aluminio se ha extendido por todo el mundo, gracias a su gran diversidad de aleaciones.

En las aplicaciones comerciales de aluminio ha habido una diversidad de composiciones de aleaciones introducidas para afrontar las necesidades del mercado. Actualmente en Venezuela la aleación AA8011 está siendo muy utilizada en la industria para la elaboración de envases alimenticios, papel de aluminio, tapas, sellos inviolables para medicamentos, aletas de intercambiadores de calor, entre otros.

En el presente trabajo de investigación se pretende evaluar el efecto del cambio en la temperatura de homogenización en el comportamiento mecánico de la aleación de aluminio AA8011, efectuando ensayos de tracción, evaluación de dureza, análisis microestructural y estudio de la superficie de fractura, Con la finalidad de comparar las propiedades mecánicas con la estructura del material y su dureza, para así verificar si es factible disminuir la temperatura de homogenización en la aleación de aluminio AA8011.

Mencionando en el capítulo 1, situación problemática, objetivos; general y específico, justificación y meta de la investigación así como también investigaciones previas. En el capítulo 2, reseña y producción del aluminio, tratamiento de homogenizado y ensayos mecánicos ensayados. En el

capítulo 3, se explica la metodología empleada para la realización tanto de los ensayos mecánicos como análisis de microestructura y fractografía. En el capítulo 4, resultados obtenidos. En el capítulo 5, análisis y observaciones de los resultados. En el capítulo 6, conclusiones y recomendaciones.

# CAPÍTULO 1

## *Problema*

---

---

### **1.1 Situación problemática**

Hoy en día el aluminio ocupa un lugar importante en el ámbito industrial, comercial e investigativo, ya que es uno de los metales dúctiles de extensa aplicabilidad, motivado a las características especiales que posee como son bajo peso, alta ductilidad, buena maleabilidad, resistencia a la corrosión, entre otros; es por ello que el empleo del aluminio se ha extendido por todo el mundo, gracias a su gran diversidad de aleaciones.

En las aplicaciones comerciales de aluminio ha habido una diversidad de composiciones de aleaciones introducidas para afrontar las necesidades del mercado. Actualmente en Venezuela la aleación AA8011 está siendo muy utilizada en la industria para la elaboración de envases alimenticios, papel de aluminio, tapas, sellos inviolables para medicamentos, aletas de intercambiadores de calor, entre otros. No obstante, existen pocas investigaciones y bibliografías sobre la misma.

A las aleaciones de aluminio se le aplica un tratamiento térmico de homogenización, posterior al proceso de colada continua, con la finalidad de eliminar variaciones en la composición y, por ende, mejorar sus propiedades mecánicas. Para ello se somete al material a altas temperaturas (cercana a los 600°C) durante largos períodos de tiempo (entre 9 y 24 horas), lo cual genera altos consumos de energía y en consecuencia, altos costos para aplicar este tratamiento térmico.

En este trabajo se pretende evaluar experimentalmente, si es factible disminuir la temperatura de homogenización de la aleación de aluminio AA8011, partiendo del material proveniente de colada continua y del material con 50% de trabajo en frío, con la finalidad de disminuir el consumo de energía del homogenizado, para ello se plantea la siguiente formulación: ¿Será factible disminuir la temperatura de homogenización de la aleación de aluminio AA8011 sin afectar considerablemente las propiedades mecánicas?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Evaluar el efecto del cambio en la temperatura de homogenización en el comportamiento mecánico de la aleación de aluminio AA8011.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Obtener las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio AA8011 a partir de ensayos de tracción al material homogenizado, partiendo del material en estado de entrega y del material con 50% de trabajo en frío, para tres temperaturas de homogenización.
- Obtener las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio AA8011 a partir de ensayos de dureza al material homogenizado, partiendo del material en estado de entrega y del material con 50% de trabajo en frío, para tres temperaturas de homogenización.
- Evaluar la microestructura de la aleación de aluminio AA8011 homogenizada, partiendo del material en estado de entrega y del material con 50% de trabajo en frío, para tres temperaturas de homogenización.
- Analizar la superficie de fractura obtenida de las muestras de los ensayos de tracción de la aleación de aluminio AA8011 para las

condiciones antes señaladas, utilizando microscopía electrónica de barrido.

- Relacionar los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas en comparación con la evaluación de la microestructura y fractografía.
- Evaluar el cambio en las propiedades mecánicas y microestructura con la variación en la temperatura de homogenización.

### **1.3 Justificación**

El aluminio es un metal ampliamente utilizado en diversas ramas de la industria; para optimizar las propiedades mecánicas del mismo se le añaden distintos elementos químicos tales como: magnesio, manganeso y silicio; para así generar las aleaciones de aluminio. Estas aleaciones son obtenidas mediante un proceso de colada continua, en donde se solidifican y se generan pequeñas partículas de precipitado.

En la mayoría de los procesos mecánicos realizados a las aleaciones de aluminio, estas pequeñas partículas de precipitado dan variaciones locales no deseadas en las propiedades mecánicas; para eliminar estas variaciones en la composición y, por ende, mejorar dichas propiedades, se debe someter al material a altas temperaturas durante largos períodos de tiempo. Este proceso llamado homogenizado requiere de mucha energía, por lo tanto es de suma importancia reducir al mínimo el consumo energético generado por este tratamiento al aluminio, para disminuir así los costos de producción, sin afectar considerablemente las propiedades mecánicas de la aleación. Adicionalmente al realizar este estudio se puede ampliar la línea de investigación estudiando otras variables, como el tiempo de permanencia en el horno.

Por todo lo antes expuesto, es importante evaluar el efecto de la temperatura en la homogenización de la aleación de aluminio AA8011, a

través del estudio de sus propiedades mecánicas siendo este el objetivo general de esta investigación.

#### **1.4 Alcance**

Mediante la presente investigación se pretende determinar la resistencia a la tracción, dureza y microestructura de la aleación de aluminio AA8011, con tres temperaturas de homogenización, dos condiciones iniciales, partiendo del material en estado de entrega y del material con 50% de trabajo en frío. La combinación de las mismas genera seis (6) condiciones de estudio, y adicionalmente se estudiará el material sin homogenizado en estado de entrega; para así definir siete (7) condiciones de estudio. En esta investigación, los tratamientos térmicos de homogenizado se realizarán durante un período 16 horas basado en los estudios de Ney (1998).

Los ensayos se desarrollarán de la siguiente manera:

- Cinco probetas para comprobar la resistencia a la tracción.
- La dureza se verificará mediante una muestra por cada condición, realizando diez penetraciones por ensayo.
- El estudio de la microestructura consta de una muestra por cada condición.
- En el estudio de la fractografía se analizará la superficie de fractura, de una probeta ensayada a tracción, por cada condición de estudio.

Después de definida la cantidad de condiciones de estudio y el número de probetas por condición, se combinan las mismas, obteniendo así:

*35 probetas para el ensayo de tracción.*

*7 muestras para el ensayo de dureza.*

## 1.5 Limitaciones

- Disponibilidad y rendimiento de los equipos de laboratorio de materiales y procesos de manufactura.
- Disponibilidad del recurso humano que labora en el laboratorio de materiales y procesos de manufactura.
- Disponibilidad de recursos económicos.

## 1.6 Antecedentes

*Puchi et al., (1994)* estudiaron la restauración de las propiedades mecánicas de una aleación Al-Fe-Si, la cual fue trabajada en frío con 50% de reducción de espesor, posterior a esto, se le aplicó un recocido a diferentes temperaturas (598, 623, 648 y 673°K), lo que les permitió llevar a cabo un análisis de los cambios en la resistencia a la tracción y dureza vickers, que se llevaron a cabo durante los tratamientos térmicos. La evolución microestructural fue analizada en términos generales. También desarrollaron un modelo matemático para la descripción del comportamiento de la restauración de la aleación en estudio, dicho modelo se rige bajo la relación generalizada de Johnson-Mehl-Avramy-Kolmogorov (JMAK).

Continuando la investigación *Puchi y colaboradores (1995)* estudiaron el recocido no isotérmico de la aleación de aluminio (8011S), proveniente de colada continua de doble rodillo y deformada en frío. Este trabajo se llevó a cabo con el objeto de comparar las curvas de restauración que se obtuvieron mediante la aplicación de un recocido anisotérmico con las que lograron predecir la forma modificada de la ecuación de Johnson-Mehl-Avramy-Kolmogorov (JMAK). El material fue deformado en frío y posteriormente tratado térmicamente por espacio de 10 horas, lo cual les permitió realizar un seguimiento tanto de la evolución microestructural como de la restauración de las propiedades mecánicas del material. Mediante el análisis de la restauración de las propiedades mecánicas fue posible

desarrollar un modelo matemático que permitiese describir el comportamiento de recristalización del material durante el tratamiento térmico aplicado, basado en un método de regresión no lineal. Igualmente la determinación de la fracción restaurada corregida por recuperación permite mostrar la gran influencia del proceso de recuperación en la restauración de las propiedades mecánicas, y además permite hacer una descripción de la cinética de recristalización en forma satisfactoria, sin tener que recurrir a mediciones de la fracción volumétrica recristalizada a partir de métodos ópticos. Finalmente la microestructura del material que presenta una condición de recristalización total, permite demostrar que los granos recristalizados no son totalmente equiaxiales.

*Ney (1998)* desarrolló un trabajo de investigación, en el cual utilizó una aleación comercial de aluminio AA-8011. Estudiando muestras, bajo diferentes estados iniciales de tensión, que endurecen con una sobresaturación de hierro y silicio usando como técnica de medida el poder termoeléctrico. La cinética isotérmica de precipitación fue obtenida en un rango de temperatura entre 225 °C y 600 °C. Determinando la fracción atómica de precipitado para cada condición microestructural, identificando los aleantes más dominantes y la evaluación de los parámetros típicos de las fases de precipitado; con la finalidad de determinar, “los diagramas de transformación de temperatura y tiempo” (TTT). Sus resultados demostraron, que el hierro es el elemento que más control tiene sobre la cinética de precipitado de la aleación AA-8011, en los rangos de temperaturas estudiados.

En otro orden de ideas, *Lazo y Colaboradores (2001)*, estudiaron como influye el tiempo y la temperatura de recocido en las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio AA-8011. Se basaron en analizar este tratamiento térmico a muestras de 6 mm de espesor, las cuales fueron deformando por laminación en frío hasta un espesor de 1 mm. Obtenidas

estas dos condiciones, sometieron tales muestras a distintas temperaturas de recocido en distintos períodos de tiempo. Posteriormente realizaron un seguimiento tanto en la evolución microestructural, como en los cambios observados en las propiedades mecánicas. De donde obtuvieron que para las muestras de 1 mm de espesor, recocida a 350°C durante un tiempo de 60 min, se presentó el fenómeno de recristalización, ya que se obtuvieron granos equiaxiales. Adicionalmente se observó que para las muestras de 6 mm de espesor no se presentaron cambios significativos en su microestructura ni en sus propiedades mecánicas.

Seguidamente *Totik et al., (2003)* desarrollaron una investigación para evaluar el efecto de la homogenización en la aleación AA6063 y AA2014, después del trabajo en frío, fue estudiada mediante el ensayo de tracción, con el objeto de evaluar el comportamiento mecánico a grandes tensiones. Adicionalmente estudiaron la dureza y microestructura, para así verificar como influye este tratamiento en la microestructura de dichas aleaciones. De esta investigación obtuvieron como resultado que al realizar este tratamiento térmico se ve afectada la microestructura de las aleaciones, además se logró mejorar el grado de la deformación en frío, según la clase de aleación y la temperatura homogenización.

*Moldovan et al., (2004)* evaluaron la evolución de la microestructura durante el proceso de deformación plástica, estudiando etapa a etapa la microestructura, de una forma cuantitativa y por microscopía electrónica, además utilizaron un microanalizador, después de realizadas las pruebas observaron como influyen los elementos aleantes, así mismo percibieron la fractura de las láminas de la aleación de aluminio 8006 como consecuencia de la fragilidad de los compuestos de hierro, manganeso, y silicio en la estructura; adicionalmente realizaron experimentos de homogeneidad antes y después de la deformación plástica en donde lograron detectar defectos

importantes en las láminas. Del cual finalmente obtuvieron como temperatura óptima de homogenización 570°C.

*Cordero et al., (2005)* estudiaron la influencia de la temperatura y tiempo de recocido sobre las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio AA8011, ellos partieron de láminas de 6mm obtenidas de colada continua, a la cual le realizaron un tratamiento térmico de homogenización y posterior a esto sometieron al material a un recocido a tres temperaturas diferentes, con distintas combinaciones de tiempo, seguidamente las muestras fueron ensayadas a tracción, compresión plana y dureza y se obtuvieron las propiedades mecánicas. Obtuvieron como principales conclusiones: que el tratamiento térmico de homogenizado es necesario para poder lograr una microestructura organizada de la matriz, eliminando la deformación previa del material, por lo que las características mecánicas fueron mejoradas, además se apreció que al aumentar la temperatura y tiempo de permanencia en el horno de igual manera se incrementó las partículas de precipitado hasta producirse un endurecimiento en la misma.

Con el mismo propósito *González et al., (2006)* estudiaron el efecto de tratamiento isotérmico sobre los cambios de fases de una aleación AA8011, en este trabajo se sometió a la aleación a un tratamiento de homogenizado durante 24 horas a 600°C, donde detectaron las transformaciones de fases isotérmicas. El calentamiento lo realizaron de manera continua de 10°C/min entre 20°C y 600°C, lo cual les permitió establecer mediante las medidas de calorimetría diferencial de barrido (DSC) las temperaturas a las cuales se genera una transformación estructural; obteniendo como resultados las temperaturas de transformación características en 271,8°C; 450°C y 474,2°C. A estas temperaturas se revelaron los cambios en el flujo de calor asociados a la existencia de procesos de precipitación y redisolución de fases.

# CAPÍTULO 2

## *Marco Teórico*

---

### **2.1 Aluminio**

El aluminio posee una combinación de propiedades que lo convierten en un material extremadamente útil en ingeniería. Tiene una densidad baja ( $2,70 \text{ g/cm}^3$ ), haciéndolo especialmente importante para el transporte de productos manufacturados, además de poseer una buena resistencia a la corrosión en la mayoría de ambientes naturales debido a la película cohesiva de óxido que se forma en su superficie.

A pesar de que el aluminio puro tiene poca resistencia con ciertos aleantes como el magnesio, manganeso y el silicio puede alcanzar resistencias de 690MPa. Una de sus principales ventajas es que no es tóxico por lo cual ciertas aleaciones se utilizan para empaquetar y contener alimentos. Las buenas propiedades eléctricas del aluminio lo hacen adecuado para muchas aplicaciones en la industria eléctrica. El precio relativamente bajo, junto a sus muchas propiedades hace que este metal sea muy importante industrialmente [Smith 2004].

### **2.2 Producción del aluminio**

El aluminio se presenta en la naturaleza combinado con otros elementos como hierro, oxígeno y silicio. La bauxita formada principalmente por óxidos hidratados de aluminio, es el mineral comercial más importante que se usa para producir aluminio. En el proceso Bayer, la bauxita reacciona

con hidróxido sódico caliente para convertir el aluminio del mineral de hierro en aluminato de sodio. Después de la separación del material insoluble se precipita el hidróxido de aluminio a partir de la solución de aluminato. La solución de hidróxido de aluminio se deja espesar y se calcina, obteniéndose así óxido de aluminio,  $Al_2O_3$ . [Smith 2004].

El óxido de aluminio se disuelve en un baño fundido de criolita ( $Na_3AlF_6$ ) y se electroliza en una celda electrolítica, utilizando ánodos y cátodos de carbono. En la electrólisis se obtiene el aluminio metálico en estado líquido que cae al fondo de la celda y se extrae periódicamente. Este aluminio extraído de la celda contiene entre un 99,5 y un 99,9 por 100 de aluminio, siendo las principales impurezas hierro y silicio. [Smith 2004].

El aluminio de la celda electrolítica se lleva a grandes hornos revestidos del material refractario donde se afina antes de la colada. Los elementos de la aleación, individualmente o en forma de lingote que los contenga, pueden fundirse también y ser mezclados con la carga del horno. En la operación de afino el metal líquido normalmente se purga con gas cloro para separar el hidrógeno disuelto y posteriormente se desespuma para separar el metal oxidado de la superficie del metal líquido. El metal que ha sido desgasificado y desespumado, se clasifica y cuela en lingotes para refusión o como lingotes primarios para láminas o lingotes de extrusión para posterior fabricación. [Smith 2004].

## **2.3 Sistemas de aleaciones de aluminio**

### **2.3.1 Generalidades**

El aluminio de una determinada pureza obtenido por reducción electrolítica de la alúmina es un material relativamente débil. Para aplicaciones que requieren una mayor resistencia mecánica se le agrega metales como el cobre, magnesio, manganeso y zinc, por lo general, en combinaciones de dos o más de estos elementos juntos con hierro y silicio.

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

### 2.3.2 Especificaciones normativas

Las aleaciones comprendidas en las normas se pueden dividir en dos grupos principales, uno es el que se usa para vaciados y el otro se emplea para fabricar formas forjadas. Para facilidad de referencia, las aleaciones para vaciados se indican por las designaciones BS 1490 LM y las aleaciones forjadas, mediante un acuerdo internacional de un sistema de cuatro dígitos de los cuales el primero de ellos indica el elemento principal de la aleación dentro del grupo como se indica en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1** Designación de grupos de aleaciones. Fuente: King (1992).

Grupo	1XXX	2XXX	3XXX	4XXX	5XXX	6XXX	7XXX	8XXX	9XXX
Elemento Principal	AL 99%	Cu	Mn	Si	Mg	Mg +Si	Zn	Otros elementos	Serie no utilizada

## 2.4 Aleación de aluminio AA8011

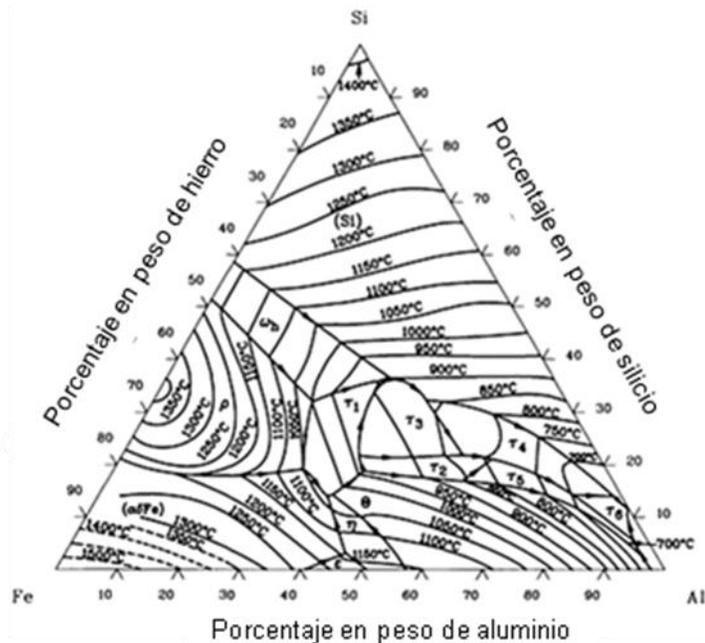
La aleación estudiada corresponde a la serie 8XXX, según la denominación 8011, otorgada por la Aluminum Association en el año 1998 cuando fue registrada en Registration Record of International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Alloys, Aluminum Association. Esta aleación tiene como principales aleantes hierro y silicio, adicionalmente contiene titanio cuya función es refinar el tamaño de grano. El efecto que tiene el hierro en la aleación es de aumentar su límite de fluencia y resistencia a la tracción, en cambio la presencia del silicio mejora la resistencia mecánica de la aleación sin reducir de modo notable la ductilidad ni la resistencia a la corrosión. Seguidamente

se presenta en la tabla 2.2, la composición química de la aleación de aluminio AA-8011.

**Tabla 2.2** Composición química de la aleación AA8011. Fuente: aluminum association (2006).

Elemento químico	Silicio (Si)	Hierro (Fe)	Cobre (Cu)	Manganeso (Mn)	Magnesio (Mg)	Cromo (Cr)	Zinc (Zn)	Titanio (Ti)	Al (min)
Cantidad (%)	0.65-0.75	0.85-0.95	0.04-0.07	0.04	0.02	0.02	0.05	0.030	---

A continuación se muestra en la figura 2.1 el diagrama de fases ternario para aleaciones Al-Fe-Si. Es de importancia resaltar el diagrama de fases ternario, ya que, en vista del hecho que las propiedades de los materiales dependen significativamente de la naturaleza, número, cantidad, y forma de las posibles fases que se presentan y pueden cambiarse por alteraciones en dichas cantidades, es vital, en el uso de materiales, conocer las condiciones bajo las cuales cualquier sistema dado puede existir en sus varias formas posibles.



**Figura 2.1** Diagrama ternario de la fase líquida de Al-Fe-Si. Fuente: Metals HandBook (1992).

## 2.5 Producción de la aleación AA8011

La aleación de aluminio AA8011, actualmente es proveniente de un proceso de colada continua, siguiendo las siguientes etapas:

**Fundición.** Se introduce la materia prima conformada por lingotes de aluminio primario, chatarra de aluminio y algunos aleantes, entre ellos, hierro y silicio. Los lingotes o pailas de aluminio primario deben ser precalentados antes de ser introducidos en el horno con la finalidad de eliminarles la humedad que puedan tener.

Una vez iniciado el proceso de fusión se deben agregar sales fundentes al horno, estas tienen como función hacer flotar las impurezas que puedan contener el aluminio primario, la chatarra y los aleantes, estas impurezas son denominadas escoria y son retiradas del horno una vez que las sales fundentes han actuado, todo esto ocurre durante el proceso de fusión.

[\[www.cvgalucasa.com.ve\]](http://www.cvgalucasa.com.ve)

Cuando se ha cumplido el tiempo necesario en el horno fusor, el contenido del mismo es trasvasado al horno de retención y de aquí pasa a un filtro en donde a la aleación se le elimina el hidrógeno que pueda contener mediante la inyección de argón en un proceso denominado desgasificación, en el canal de trasvase ubicado entre el horno de retención y el desgasificador se inyecta Titanio-Boro en forma de alambón, con la finalidad de refinar el tamaño del grano de la aleación, posteriormente la mezcla pasa por filtro cerámico quedando limpia de impurezas y lista para el siguiente paso que es la colada continua. [\[www.cvgalucasa.com.ve\]](http://www.cvgalucasa.com.ve)

**Colada.** Se hace fluir el metal proveniente del desgasificador entre dos rodillos que tienen una camisa por la que pasa agua, con la intención de extraer calor y de esta forma obtener la solidificación del metal a medida que se va conformando la lámina, estandarizada en 6 milímetros de espesor, y cuyo ancho varía según sea los requerimientos y especificaciones de la orden de venta. La lámina que se produce en la máquina de colada es

enrollada en un eje metálico llamado mandril, una vez que el rollo tiene el diámetro exterior requerido se desmonta y se fleja del mandril. De esta etapa ya sale el primer producto terminado que ofrece la empresa, este producto se denomina lámina de alto espesor. [[www.cvgalucasa.com.ve](http://www.cvgalucasa.com.ve)]

## **2.6 Efectos de los principales componentes de la aleación AA8011 sobre sus propiedades**

**Cobre:** Es muy poco soluble en el aluminio (0,2% a la temperatura ambiente y 5,7% a 548°C) y forma un compuesto intermetálico. Facilita la colabilidad y desgasificación disminuyendo la resistencia a la corrosión, se emplea tanto en las aleaciones fundidas como en las de forja. Permite el endurecimiento por envejecimiento.

**Silicio:** Este elemento que es insoluble en el aluminio, hace que la contracción de solidificación sea inferior a la de las restantes aleaciones de moldeo. Mejora las características mecánicas y sus aleaciones son susceptibles de mejora cuando se asocia con el Mg, con el que forma  $Mg_2Si$ .

**Hierro:** Este elemento aumenta ligeramente la resistencia a la tracción. La baja cantidad de hierro en el aluminio provoca la formación de partículas intermetálicas incoherentes (Al-Fe-Si) que dependiendo del tamaño actuarán como dispersores de la deformación plástica. Además el hierro reduce la cantidad de silicio libre, disminuyendo la tendencia a la fragilidad.

## **2.7 Homogenización**

### **2.7.1 Generalidades**

La homogenización es un tratamiento de alta temperatura durante largos periodos de tiempo para eliminar los gradientes de concentración del soluto en la matriz sobreenfriada producto del vaciado y regresa a solución sólida tantos cristales y material intermetálico como sea posible, formados o precipitados en la frontera reticular y su reprecipitación en una forma que se optimice el comportamiento posterior del material durante la laminación en

caliente y en frío o durante la extrusión. Este es un tratamiento para la modificación de la estructura [King 1992].

La homogenización causa que las estructuras evolucionen con rapidez hacia el estado de equilibrio termodinámico, sin que se eliminen todos los efectos que queden del proceso de vaciado. Otro efecto de la homogenización consiste en revelar los esfuerzos internos del vaciado [King 1992].

El material que se ha vaciado, homogenizado y trabajado en caliente, se comporta de manera diferente al material del mismo vaciado que se ha homogenizado, enfriado a temperatura ambiente y después recalentado para trabajarlo en caliente. El efecto de volver a enfriar a 20°C es el de precipitar el material intermetálico y si el tiempo de recalentamiento antes de ser trabajado en caliente no es el suficiente como para volverlo a pasar a solución, el material responde de manera distinta al trabajo en caliente [King 1992].

El tratamiento térmico de homogenización se debe realizar a una temperatura menor que la del sólido que funde más bajo en la aleación fundida. Es por ello que este tratamiento térmico debe realizarse con sumo cuidado, ya que si se atravesara la línea de solidus, los contornos de granos se fundirían, modificándose su forma y las propiedades físicas de la aleación.

Para la realización del tratamiento térmico de homogenización es necesario el uso de hornos bajo estricto control de su ambiente interno y externo.

### **2.7.2 Efectos de la Homogenización sobre aleaciones comerciales de aluminio provenientes de colada continúa**

El tratamiento térmico de homogenización aplicado a las aleaciones comerciales de aluminio provenientes de un proceso de colada continua, ejerce un efecto no solo sobre la microestructura obtenida de la fusión y de la

colada, sino que tiene además un papel primordial sobre las propiedades del producto final. Los efectos que se persiguen con la aplicación de este tratamiento pueden resumirse de la siguiente forma:

- a) Eliminación de gradientes de concentración de Fe y Si, permitiendo que la aleación responda más rápidamente a tratamientos posteriores, es decir, precipitación de los elementos sobresaturados en forma adecuada.
- b) Coalescencia y alteración de la forma y naturaleza de los constituyentes insolubles de Al-Fe-Si, para evitar el deterioro de la aleación durante los procesos de deformación posteriores.
- c) Redistribución del hierro sobresaturado, ya que este a pesar de su baja solubilidad en el aluminio es capaz de alcanzar concentraciones elevadas cuando la velocidad de solidificación es elevada.

Para garantizar una apropiada homogenización se debe seleccionar cuidadosamente los parámetros involucrados en este tratamiento, como lo son: temperatura, tiempo de permanencia en el horno y velocidad de enfriamiento.

## **2.8 Recristalización**

Cuando se calienta un metal trabajado en frío a una temperatura suficientemente alta, se nuclean nuevos granos libres de deformación en la estructura del metal recuperado, e inician su crecimiento, formando una estructura de material recristalizado. Después de suficientemente tiempo a la temperatura a que tiene lugar la recristalización, la estructura de trabajado en frío se reemplaza completamente por una estructura de granos recristalizados.

La resistencia a la tracción de un metal trabajo en frío disminuye de forma importante y su ductilidad aumenta mediante un recocido que produce una recristalización de la estructura del metal. *[Smith 2004].*

## 2.9 Ensayos Mecánicos

### 2.9.1 Ensayo de tracción

Un ensayo de tracción consiste en aplicar cargas o tensiones uniaxiales a un material las cuales provocan una deformación. Cuando el material es sometido a una tensión inferior a su límite elástico, la deformación o alargamiento producido será transitorio, ya que desaparece al cesar de actuar la tensión que la produce, recuperando sus dimensiones iniciales. Por el contrario si la tensión aplicada supera el límite elástico, la deformación producida ya no es transitoria, pues aunque sobre el cuerpo actué una fuerza contraria, este no recupera su forma original.

El ensayo de tracción se realiza mediante dispositivos mecánicos o hidráulicos que permiten aplicar una carga axial sobre probetas de sección y dimensiones preestablecidas. Este estudio es uno de los más utilizados para determinar algunas características mecánicas de los metales y aleaciones. Algunas de estas propiedades son: límite de proporcionalidad, límite elástico, punto de fluencia, límite de fluencia, carga máxima, carga de rotura, ductilidad y alargamiento.

Las características que pueden determinarse mediante un ensayo de tracción son las siguientes:

**Límite elástico (LE).** Es el esfuerzo a partir del cual se produce la primera deformación permanente, este valor puede aproximarse al límite de proporcionalidad del material en prueba. En la figura 2.4 se aprecia dicho límite

**Límite proporcional (P).** Representa el punto final de la recta ascendente donde el esfuerzo es proporcional a la deformación, es decir, es el esfuerzo límite del rango de proporcionalidad. El mismo se representa con el punto P de la figura 2.4.

**Módulo de elasticidad ( $E_o$ ).** Representa la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación elástica que sufre el material. Este valor se obtiene midiendo la pendiente de la parte inicial rectilínea del diagrama tensiones-alargamiento (figura 2.4).

**Esfuerzo de fluencia ( $S_{0,2\%}$ ).** Solo se presenta en ciertos materiales dúctiles, representa un valor de esfuerzo donde el material se deforma sin que aumente el valor de carga aplicada y es superior al límite elástico. Dicho esfuerzo es el correspondiente al punto Y de la figura 2.4.

**Esfuerzo máximo ( $S_u$ ).** Superado el punto de fluencia y manteniéndose el incremento del esfuerzo según la deformación experimentada, se alcanza el punto de resistencia al límite o esfuerzo máximo que puede ser desarrollado por el material. En el punto M de la figura 2.4 se representa dicho esfuerzo.

**Esfuerzo a la ruptura ( $S_r$ ).** Es el valor resultante del cociente entre la carga en la ruptura y el área transversal original. El esfuerzo a la ruptura es generalmente inferior que el esfuerzo máximo. Para un material frágil, el esfuerzo máximo y el esfuerzo de ruptura coinciden. En el punto B de la figura 2.4 se aprecia el esfuerzo de ruptura.

**Alargamiento ( $\Delta L$ ).** Es la variación de la longitud calibrada mediante la aplicación de carga en el ensayo de tracción. Donde  $L_0$  es constante y representa la longitud calibrada de las probetas.

$$\Delta L = L_f - L_0 \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

**Ductilidad.** La ductilidad de un material expresa la cantidad de deformación que es capaz de sufrir antes de la rotura. Esta cantidad puede determinarse a partir de los valores de alargamiento obtenidos en el ensayo de tracción.

- **Elongación.** Para determinarlo se marcan sobre las probetas antes de comenzar el ensayo unos trazos a una distancia

determinada, midiéndose después del ensayo, juntando las dos mitades de las probetas, la distancia que los separa.

$$\text{elongación}(\%) = \frac{L_f - L_0}{L_0} * 100 \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

En donde  $L_0$  es la longitud inicial entre trazos y  $L_f$  es la longitud final entre trazos.

Al indicar el alargamiento porcentual hay que señalar la longitud entre trazos inicial de la probeta, ya que el valor absoluto del alargamiento variara con el valor de dicha longitud.

- **Reducción de área (RA).** Este valor se determina midiendo el área de la mínima sección recta, obtenida uniendo las dos mitades de la probeta y empleando la ecuación 2.3.

$$RA(\%) = \frac{A_0 - A_f}{A_0} * 100 \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

En donde " $A_0$ " es el área de la sección recta original y " $A_f$ " el área de la sección recta final.

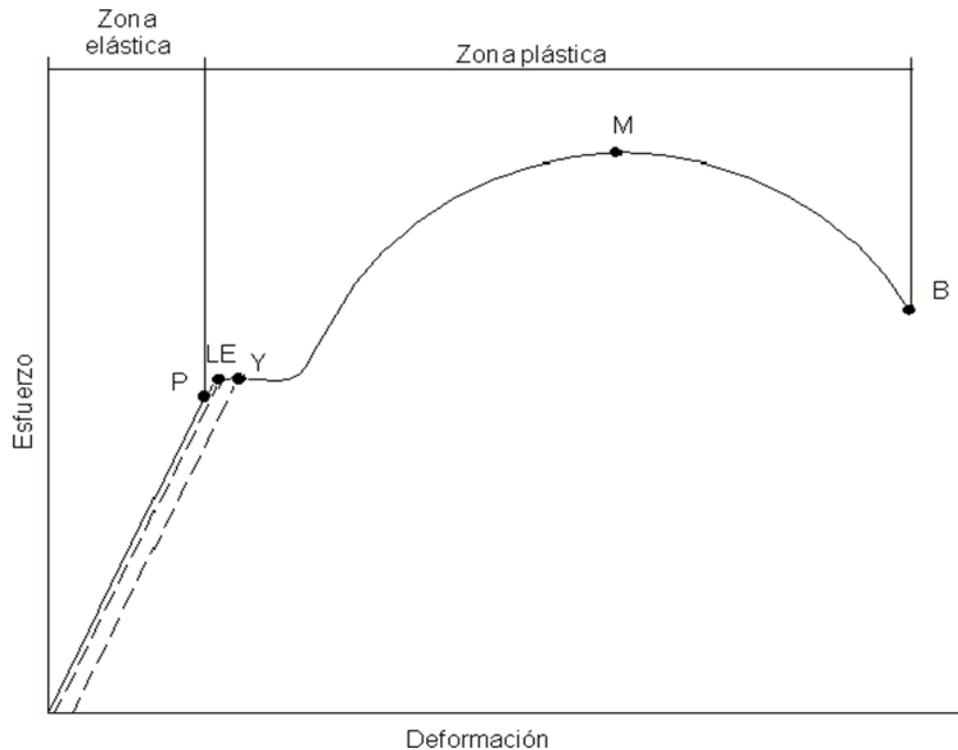
La curva de esfuerzo deformación ingenieril o nominal se obtiene a partir de las medidas de carga y alargamiento. El valor del esfuerzo y deformación que soporta el material se definen con las ecuaciones 2.4 y 2.5 respectivamente:

$$S = \frac{P(N)}{A_0(m^2)} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

$$\text{Deformación} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Si a todos los valores de la carga aplicados progresivamente se dividen por el área inicial de la probeta ( $A_0$ ), se obtienen los diferentes valores del esfuerzo convencional o nominal aplicados, y si a todos los valores de  $L$

observados y medidos se dividen por la longitud inicial de prueba ( $L_0$ ), se obtienen los diferentes valores de deformación convencional ingenieril o nominal del ensayo. Estos valores se pueden representar en un sistema de ejes ortogonales obteniendo la curva esfuerzo – deformación ingenieril (figura 2.4).



**Figura 2.2** Diagrama tensiones-alargamiento

### 2.9.2 Ensayo de dureza.

La dureza de un metal se mide penetrando con un indentador sobre su superficie. El material del penetrador o indentador, que es usualmente una bola, pirámide o cono, está hecho de un material mucho más duro que el material a ensayar. Los materiales más comúnmente utilizados como penetradores son los aceros endurecidos, el carburo de tungsteno y el diamante. Para la mayoría de los ensayos de dureza estándar se aplica

lentamente una carga conocida presionando el penetrador a 90° en la superficie del material. Se calcula un valor de dureza empírica o se lee en una escala analógica (o pantalla digital), que se basa en el área de la sección o en la profundidad de la impresión. [Avner 1977].

### **2.9.3 Microscopía óptica**

Para la observación de la microestructura es necesario someter a la probeta a una serie de pasos para obtener la superficie de estudio deseada. Un primer paso es el desbaste, consiste en lijar la pieza hasta obtener una superficie lisa. Para lograr dicha superficie se debe lijar la muestra con papel de esmeril de diferentes denominaciones desde las más gruesas hasta las más finas, posteriormente se realiza el pulido, que consta de hacer pasar las muestras por un plato horizontal giratorio cubierto con un paño especial sobre el cual se aplica una solución de agua destilada con polvo abrasivo, cuidadosamente tamizado.

Los abrasivos que se emplean en el pulido de los diferentes materiales metálicos, son el polvo de diamante, el óxido de magnesio, el óxido de cromo y alúmina.

Otro paso es el ataque químico, el cual consiste en desarrollar la estructura micrográfica y hacerla visible al microscopio, el ataque es efectuado por medio de reactivos químicos, que actúan sobre la superficie pulimentada de la muestra, permitiendo distinguir claramente las distintas partes de la microestructura. Los reactivos empleados para poner de manifiesto los constituyentes de la estructura, son varios y, en cada caso, debe hacerse uso del más conveniente según la naturaleza del metal o aleación y la estructura específica que se desea observar [Avner 1977].

**Tabla 2.3** Reactivos utilizados en ataque de las muestras micrográficas. Fuente: Metals Handbook (1948).

Reactivo	Composición	Empleo	Observaciones
Acido nítrico. (nital)	Acido nítrico 1-5ml Alcohol metílico o etílico (95% o absoluto) 100ml (también alcohol amílico)	En los aceros al carbono: (1) oscurece la perlita y proporciona contraste entre sus constituyentes; (2) destaca los contornos de ferrita; (3) destaca los cristales de ferrita en las estructuras martensíticas.	La intensidad del ataque aumenta disminuyendo la selectividad al aumentar los porcentajes de HNO <sub>4</sub> . El reactivo <sup>2</sup> (acido pícrico) normalmente es superior.
Acido pícrico. (picral)	Acido pícrico 113gr Alcohol metílico o etílico (95% o absoluto) 100ml	En los aceros al carbono cualquiera que sea su estad: recocido, normalizado, templado y revenido, globulizado, austemperizado.  En todos los aceros de baja aleación.	Alguna vez las aleaciones más diluidas resultan más útiles. No destaca los contornos de los granos de ferrita con tanta facilidad como el nital.  Duración del ataque desde unos segundos a 1 minuto o más.
Cloruro férrico y acido clorhídrico.	Cloruro férrico 5gr Acido clorhídrico 50ml Agua 100ml	Revela la estructura de los aceros inoxidables y al níquel austeníticos.	
Hidróxido amónico y peróxido de hidrogeno.	Hidróxido amónico 5partes Agua 5partes Peróxido de hidrogeno 1-5partes	Se emplea generalmente para el ataque del cobre y de muchas de sus aleaciones.	El contenido en peróxido varia proporcionalmente con el contenido de cobre de la aleación que se va a atacar. Inmersión o friccionado durante 1 minuto aproximadamente. Para conseguir buenos resultados utilizar peróxido reciente.
Persulfato amónico.	Persulfato amónico 10gr Agua 90ml	Cobre, latón, bronce, latón al níquel, bronce al aluminio.	Se emplea en frio o en caliente; inmersión.
Reactivo palmerton.	Oxido crómico 200gr Sulfato sódico 15gr Agua 1.000 ml	Reactivo general del zinc y de sus aleaciones.	Inmersión con agitación suave.
Molibdato amónico.	Acido molibdico (85%) 100 g Hidróxido amónico 140 ml (Densidad relativa 0.9) Agua 240ml Filtrar y añadir acido nítrico 60ml	Ataca rápidamente el plomo y sus aleaciones; muy adecuado para eliminar la capa de metal trabajado.	Alternativamente friccionar la muestra y lavarla en agua corriente.

**Continuación. Tabla 2.3** Reactivos utilizados en el ataque de las muestras micrográficas.  
Fuente: Metals Handbook (1948)

Molibdato amónico.	Acido molibdico (85%) 100 g  Hidróxido amónico 140 ml  (Densidad relativa 0.9)  Agua 240ml  Filtrar y añadir acido nitríco (densidad relativa 1.32) 60ml	Ataca rápidamente el plomo y sus aleaciones; muy adecuado para eliminar la capa de metal trabajado.	Alternativamente friccionar la muestra y lavarla en agua corriente.
Acido fluorhídrico.	Acido fluorhídrico (conc) 0.5ml  H <sub>2</sub> O 99.5ml	Reactivo general del aluminio y sus aleaciones.	Friccionar con un algodón suave durante 15 segundos.

# CAPÍTULO 3

## *Marco Metodológico*

---

### **3.1 Desarrollo experimental**

En el presente trabajo se tiene por objeto evaluar el efecto del cambio en la temperatura de homogenización en el comportamiento mecánico de la aleación de aluminio AA8011.

El desarrollo experimental de este trabajo se inicio partiendo de una lámina rectangular proveniente de un proceso de colada continua. A esta lámina se le realizó un corte transversal, para tomar parte de ella y aplicarle un 50 % de trabajo en frío. Posteriormente, se procedió a la realización de las probetas, mediante corte por chorro de agua (waterjet). Seguidamente a estas muestras se les aplicó el tratamiento térmico de homogenizado a distintas temperaturas durante un largo período de tiempo.

Una vez aplicado dicho tratamiento térmico, se evaluaron las propiedades mecánicas de la aleación, su microestructura y características mediante ensayos, pruebas y evaluaciones a las cuales fueron sometidas las probetas.

En la figura 3.1 se muestra el esquema de trabajo, en donde se ilustran los pasos seguidos para el cumplimiento de los objetivos.

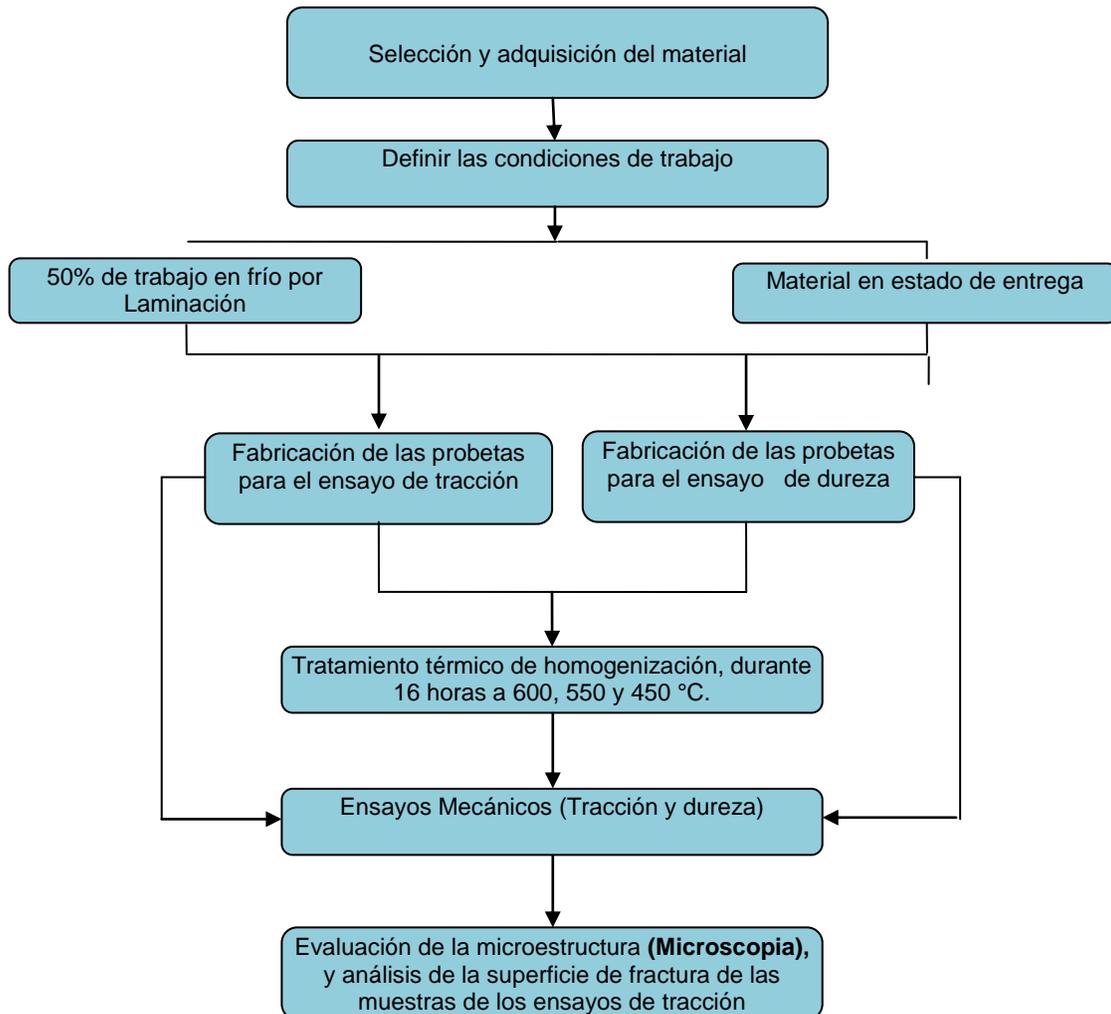


Figura 3.1 Esquema del desarrollo del trabajo

### 3.2 Descripción del material

Se utilizó una lámina de la aleación de aluminio AA8011 de 1400 mm de ancho por 255 mm de largo y un espesor de 6 mm, proveniente del proceso de colada continua de la empresa ALUCASA, Aluminios de Carabobo, S.A.

Para conocer los componentes químicos del material en estudio y el porcentaje en que se encuentran presentes los elementos aleantes se utilizó

un espectrómetro de emisión de electrones, disponible en el laboratorio de la empresa antes mencionada.

### 3.3 Condiciones de trabajo

Para el desarrollo de esta investigación se definieron siete (7) condiciones de trabajo, seis (6) producto de combinaciones de condiciones iniciales del material (material en estado de entrega y material trabajado en frío con 50% de reducción y diferentes temperaturas de homogenización (600, 550 y 450 °C)); adicionalmente se evaluó el material en estado de entrega, para así establecer la condición inicial del material, como se muestra en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Condiciones de trabajo

Condición	Condición inicial	Temperatura (°C)
1	Estado de entrega	---
2	Estado de entrega	600
3	Estado de entrega	550
4	Estado de entrega	450
5	Trabajo en frío	600
6	Trabajo en frío	550
7	Trabajo en frío	450

### 3.4 Laminación en frío

El material fue laminado partiendo de 6 mm hasta obtener un espesor final de 3 mm, lo que equivale a 50% de reducción de espesor.

El proceso de laminado se llevó a cabo mediante múltiples pasadas de las láminas a través de los rodillos del laminador los cuales tienen un diámetro de 150 mm cada uno. Este proceso finalizó al obtener el espesor de lámina preestablecido. El laminador utilizado es marca STANAT, modelo TA3155X8, con una potencia de 15 hp, y velocidad de los rodillos entre 0 y

200 pies/min, dicha máquina se encuentra disponible en los espacios del laboratorio E, de la Universidad Simón Bolívar y se muestra en la figura 3.2.



**Figura 3.2** Laminador en frío

### **3.5 Tratamiento térmico de homogenización**

Este tratamiento térmico se realizó con la finalidad de eliminar las tensiones internas debido a la microestructura deformada y presentes en el material debido a la colada continua.

El tratamiento de homogenizado se llevó a cabo primeramente encendiendo el horno y esperando que alcanzara la temperatura preestablecida, después de ello se introdujo el material en el mismo, y a partir de este momento se comenzó a contabilizar el tiempo de permanencia dentro de este. El tratamiento se realizó en tres etapas y consistió en calentar el material a (600, 550 y 450°C) durante 16 horas [Ney 1998]. Después de transcurrido el tiempo preestablecido se sumergió en agua a 20°C. Para el homogenizado de las muestras se utilizó el horno Furnace 48000 que se muestra a continuación en la figura 3.3.



Figura 3.3 Horno Furnace 48000 ubicado en el laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

### 3.6 Ensayo de tracción

La técnica utilizada para la fabricación de las probetas de tracción fue el corte por chorro de agua (waterjet) cumpliendo con las dimensiones requeridas e indicadas por la norma ASTM E8 (Apéndice II), las probetas son tipo "Sheet", de 200 mm de longitud y 50 mm de longitud calibrada (figura 3.4)

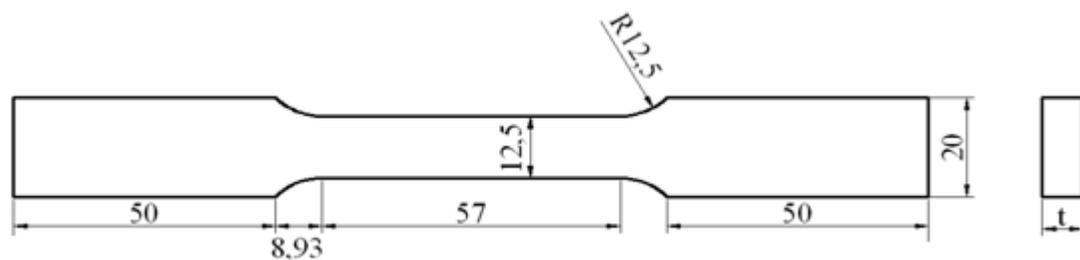
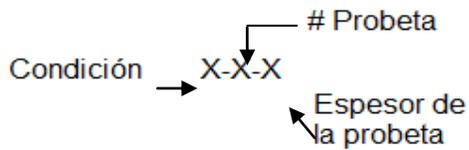


Figura 3.4 Probeta tipo sheet

En la figura 3.5 se denota la nomenclatura utilizada para diferenciar las probetas bajo las condiciones de estudio. La primera sigla revela la presencia o no de tratamiento térmico, pudiendo ser: "D" para la condición original, "A" para las muestras tratadas térmicamente a 600°C, "B" para las probetas tratadas térmicamente a 550°C y "C" para las sometidas a 450°C. La segunda sigla representa el número de la probeta y la última sigla simboliza

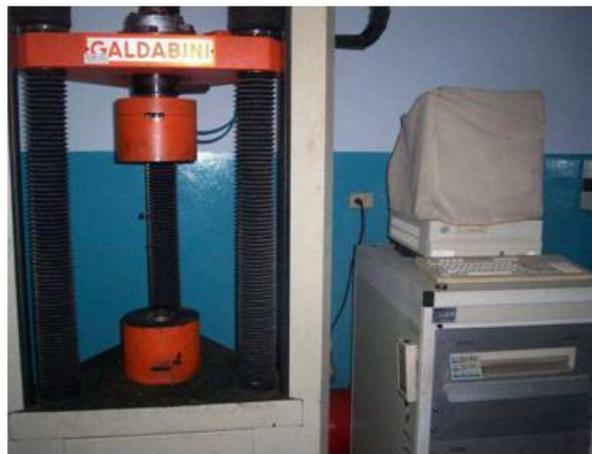
su espesor, este último puede ser “1” ó “2”, siendo 6 mm ó 3 mm respectivamente, como se observa en la tabla 3.2.



**Figura 3.5** Leyenda utilizada para la diferenciación las probetas

<b>Tabla 3.2</b> Nomenclatura de las muestras	
Nomenclatura	Condición
D-X-1	Original
A-X-1	Tratada 600°C sin trabajo en frío
A-X-2	Tratada 600°C con trabajo en frío
B-X-1	Tratada 550°C sin trabajo en frío
B-X-2	Tratada 550°C con trabajo en frío
C-X-1	Tratada 450°C sin trabajo en frío
C-X-2	Tratada 450°C con trabajo en frío

Los ensayos de tracción se ejecutaron a una velocidad de 5mm/min en el equipo universal para ensayos de materiales, marca GALDABINI de 20 toneladas de capacidad, el cual se muestra en la figura 3.6. Este equipo se encuentra disponible en el Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.



**Figura 3.6** Máquina universal GALDABINI para ensayo de tracción

La máquina utilizada para el ensayo de tracción arrojó las curvas de carga vs. elongación de las muestras ensayadas por cada condición de trabajo (Apéndice IV), posteriormente se procedió a realizar la curva esfuerzo vs. deformación, y de la misma se obtuvieron las propiedades mecánicas: esfuerzo de fluencia ( $S_{0,2\%}$ ), esfuerzo último ( $S_u$ ) y esfuerzo de ruptura ( $S_r$ ), cumpliendo con el siguiente procedimiento:

Primeramente se obtuvieron los valores de esfuerzo y deformación que arrojó el ensayo del material, aplicando las ecuaciones 2.4 y 2.5 respectivamente.

Seguidamente se realizó una hoja de cálculo, de donde se obtuvo el comportamiento del esfuerzo vs. deformación. Mediante esta curva se obtuvieron las siguientes propiedades mecánicas: esfuerzo de ruptura, esfuerzo de fluencia y esfuerzo último. Para la obtención del esfuerzo de fluencia, se empleó el método offset.

Para medir la ductilidad de la aleación de aluminio AA8011 se calcularon los porcentajes de elongación (elong(%)) y reducción de área (RA%), mediante las ecuaciones 2.2 y 2.3 respectivamente.

### **3.7 Ensayo de dureza**

El ensayo de dureza se llevó a cabo utilizando las mismas muestras ensayadas a tracción. A dichas probetas se les aplicó un desbaste ligero para así garantizar una superficie totalmente plana y con ello generar indentaciones con el mínimo error posible. Este ensayo se realizó midiendo dureza en la escala Brinell, según lo estipulado en la norma ASTM E140 (2005), la cual indica las características del ensayo como son el tipo de indentador y la carga a aplicar. Para la aleación de aluminio en estudio AA8011 se utilizó un penetrador de bola de acero de 10 mm de diámetro, y una precarga de 500 kgf, durante 20 seg, parámetros especificados bajo la norma del ensayo de dureza Brinell. El durómetro Brinell estándar utilizado

se presenta en la figura 3.7, y se encuentra en la empresa PC PISTONS C.A.

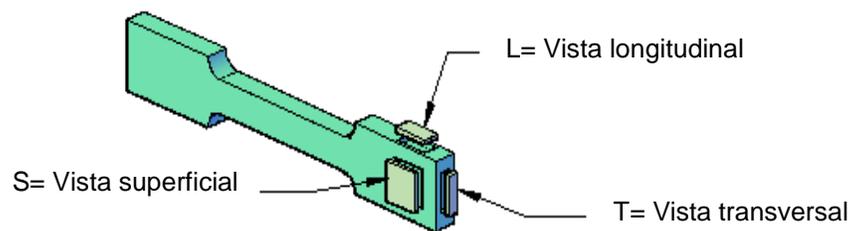


**Figura 3.7** Durómetro Brinell

### 3.8 Microscopia óptica

Este análisis se realizó en el Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Facultad de Ingeniería, con la ayuda del microscopio óptico disponible.

En la figura 3.8 se puede apreciar la distribución de las zonas de estudio para los ensayos de microestructura.



**Figura 3.8** Disposición de las zonas extraídas para el estudio de microscopía.

Se analizaron muestras del material embutidas en baquelita, esto debido a que el material utilizado se presentó en láminas planas y de bajo espesor. Dicho ensayo permite verificar la formación de granos, variación de sus propiedades y estructuras después de los tratamientos térmicos.

Para la realización de este análisis microestructural, se efectuó una preparación previa de las probetas utilizadas (preparación metalografía) de la siguiente manera: se efectuaron operaciones convencionales de desbaste, partiendo de papel abrasivo de grado 240, después de apreciar una superficie totalmente debastada en una sola dirección, se procedió a cambiar el grado de papel abrasivo a 320 y se realizó el desbaste en dirección perpendicular a las rayas dejadas por el papel anterior, esta secuencia se aplicó de la misma manera hasta desbastar con el papel abrasivo de 600.

Seguidamente para obtener una superficie perfectamente pulida, se colocó cada muestra sobre un plato giratorio con paño de lana (pulido grueso), utilizando para ello alúmina como fluido de pulido. Después de haber pasado por este, se aplicó la última pasada sobre un plato giratorio con paños de lana fino (pulido fino) y utilizando esta vez como fluido de pulido sílice coloidal, esta última pasada fue realizada en el laboratorio de la empresa ALUCASA, S.A., la etapa culminó al observar las muestras al microscopio y verificar que estaban preparadas para ser atacadas químicamente.

Al corroborar la inexistencia total de rayas y el perfecto estado de las superficies, se inició el ataque químico, para ello, se preparó ácido fluorhídrico al 10% de pureza con 90% de agua. El ataque de las muestras se desarrolló sumergiendo dichas muestras en el reactivo durante un lapso de 30 segundos, rápidamente se lavaron las muestras con agua y de inmediato fueron sacadas completamente para poder visualizarlas al microscopio. Este proceso fue realizado en el laboratorio de la empresa ALUCASA, S.A.

Para finalizar se observaron y fotografiaron cada una de las muestras, por cada una de las superficies (transversal, longitudinal y superficial) a aumentos de 100x, 200x y 400x. El microscopio óptico utilizado se encuentra disponible en el Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la

Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo y se exhibe en la figura 3.9.



**Figura 3.9** Microscopio óptico

### **3.9 Fractografía.**

Consistió en analizar la superficie de fractura de las probetas ensayadas a tracción, las muestras al ser sometidas a dicho ensayo presentaron una superficie de fractura con irregularidades muy pronunciadas, por lo cual estas superficies no se pudieron analizar en un microscopio óptico, debido a su limitada capacidad, para ello se empleó un microscopio electrónico de barrido, que posee la capacidad de ampliación superior a 50000 X, para este caso las muestras se observaron con 1000X.

La preparación de las muestras consistió en cortar la superficie de fractura a 12 mm de longitud, luego se observaron al microscopio y se fotografiaron ciertas zonas de la fractura. Este análisis se llevo a cabo con la finalidad de detectar la presencia de clivajes o dimples en la superficie y así lograr definir el tipo de fractura presente por condición de estudio. El microscopio electrónico de barrido utilizado se muestra en la figura 3.10 y se encuentra disponible en el laboratorio de análisis de superficies de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad Carabobo (Facyt).

La nomenclatura utilizada para diferenciar las fotografías de las muestras es la siguiente: 1= Espesor de 6mm y 2= Espesor de 3mm.



**Figura 3.10** Microscopio electrónico de barrido

### 3.10 Lista de equipos utilizados

- *Horno.*

Marca: Thermolyne

Modelo: Furnace 48000

Rango de operación (°C).

Corriente continua 0-1093

Corriente alterna 0-1200

- *Maquina universal para ensayo de tracción.*

Marca: GALDABINI

Modelo: CTM 20

Capacidad: 20 Ton

- *Durometro Brinell Estándar*

Marca: Detroit Testing Machine

Modelo: HB 2 – N°943

- *Microscopio Óptico.*

Marca: Union

Modelo: MC 86267

Rango: 100X a 1000X

- *Microscopio Electrónico de Barrido.*

Marca: JEOL

Modelo: JSM-5300

Rango: 250X a 50000X

# CAPÍTULO 4

## *Resultados*

---

### 4.1 Caracterización del material

Al material se le realizó el ensayo de espectrometría para verificar el porcentaje de cada uno de los elementos aleantes que lo componen, tal como se muestra en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Composición química de la muestra

Aleación	Silicio	Hierro	Cobre	Manganeso	Magnesio	Cromo	Zinc	Titanio	Al
AA8011	(Si)	(Fe)	(Cu)	(Mn)	(Mg)	(Cr)	(Zn)	(Ti)	(min)
%	0,639	0,852	0,041	0,0066	0,0024	0,002	0,0026	0,0014	98,42

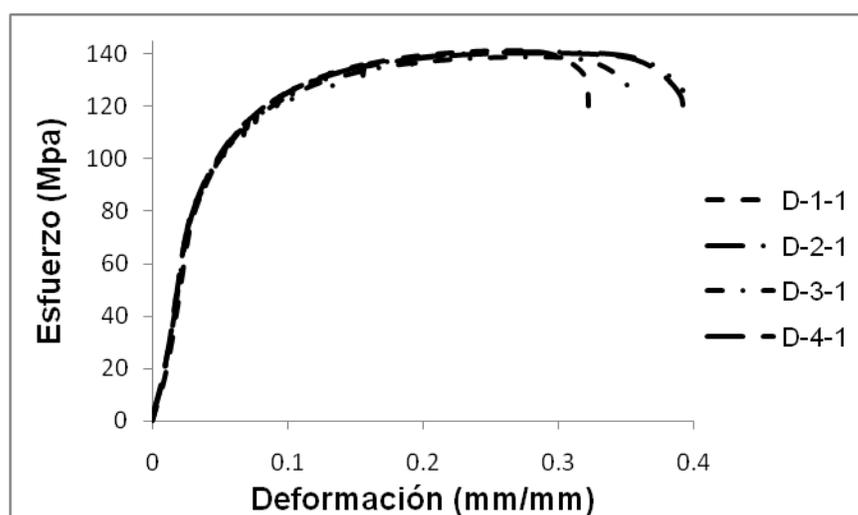
### 4.2 Ensayo de tracción

En la tabla 4.2 se presentan los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas del ensayo de tracción (esfuerzo de fluencia, esfuerzo ruptura y esfuerzo último), realizado a probetas en condición original. Por otra parte, en las tablas 4.3, 4.5 y 4.7 se representan las mismas propiedades mecánicas para las probetas tratadas térmicamente sin trabajo en frío (6mm de espesor). Por último, los resultados de las probetas estudiadas con 50 % de trabajo en frío se observan en las tablas 4.4, 4.6 y 4.8, los promedios de las propiedades mecánicas de las condiciones en estudio se muestran en la tabla 4.9.

En las figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 se visualizan las curvas esfuerzo vs. deformación de cada una de las muestras ensayadas por condición de estudio. Finalmente en la figura 4.8 se aprecia la curva esfuerzo vs. deformación de la tendencia de las distintas condiciones en estudio.

**Tabla 4.2** Propiedades mecánicas obtenidas mediante el ensayo de tracción a muestras en condición original sin trabajo en frío, espesor 6 mm

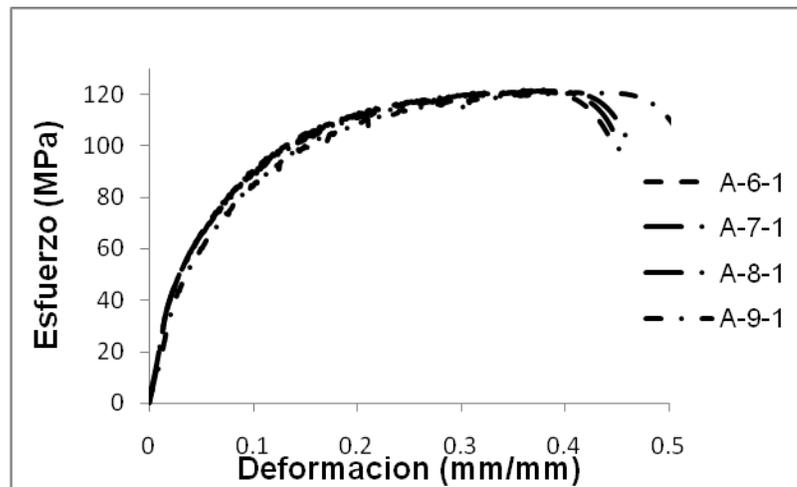
Probeta	RA (%)	$S_{0,2\%}$ (Mpa)	$S_r$ (Mpa)	$S_u$ (Mpa)	elong(%)
D-1-1	44,72	84,66	128,46	141,32	22,72
D-2-1	44,45	84,68	126,14	140,79	24,13
D-3-1	40,69	82,01	126,31	138,65	21,01
D-4-1	42,55	84,00	125,30	140,13	23,37
Promedio	43,10	83,84	126,55	140,22	22,81
Desviación	1,88	1,26	1,34	1,16	1,33



**Figura 4.1** Curvas de esfuerzo vs. deformación en condición original ensayadas a tracción

**Tabla 4.3** Propiedades mecánicas obtenidas mediante el ensayo de tracción a muestras tratadas térmicamente,  $T=600^{\circ}\text{C}$  y espesor de 6mm

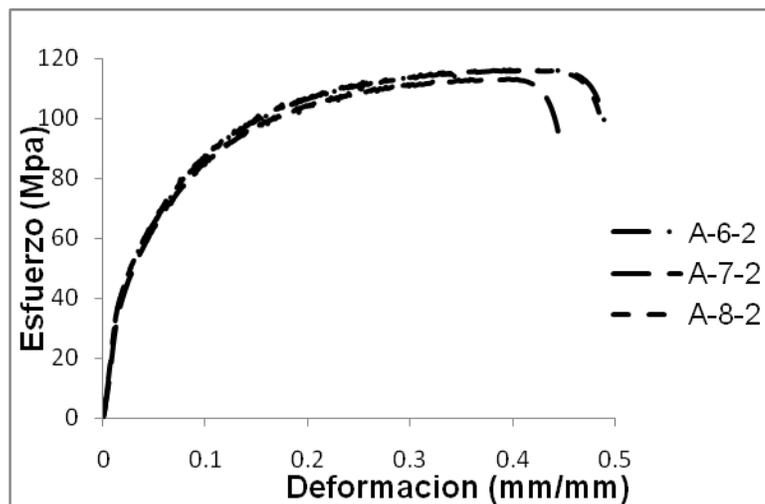
Probeta	RA (%)	$S_{0,2\%}$ (Mpa)	$S_r$ (Mpa)	$S_u$ (Mpa)	elong(%)
A-6-1	53,36	49,06	98,03	121,05	22,84
A-7-1	47,27	47,95	98,36	121,62	22,72
A-8-1	48,10	48,83	98,71	121,39	23,78
A-9-1	55,41	48,96	97,35	120,92	25,60
Promedio	51,04	48,70	98,11	121,25	23,73
Desviación	3,97	0,51	0,58	0,32	1,33



**Figura 4.2** Curvas de esfuerzo vs. deformación de las muestras tratadas térmicamente a 600°C y con espesor de 6mm, ensayadas a tracción

**Tabla 4.4** Propiedades mecánicas obtenidas mediante el ensayo de tracción a muestras tratadas térmicamente, T=600°C y espesor de 3mm

Probeta	RA (%)	S <sub>0,2%</sub> (Mpa)	S <sub>r</sub> (Mpa)	S <sub>u</sub> (Mpa)	elong(%)
A-6-2	55,20	48,34	97,50	116,49	25,76
A-7-2	59,84	47,94	92,90	113,20	23,31
A-8-2	61,17	48,44	98,24	116,13	24,81
Promedio	58,74	48,24	96,21	115,27	24,63
Desviación	3,13	0,27	2,89	1,80	1,23



**Figura 4.3** Curvas de esfuerzo vs. deformación de las probetas tratadas térmicamente a 600°C y con espesor de 3mm, ensayadas a tracción

**Tabla 4.5** Propiedades mecánicas obtenidas mediante el ensayo de tracción a muestras tratadas térmicamente, T=550°C y espesor de 6mm

Probeta	RA (%)	S <sub>0,2%</sub> (Mpa)	S <sub>r</sub> (Mpa)	S <sub>u</sub> (Mpa)	elong(%)
B-1-1	46,88	49,18	95,66	114,84	26,90
B-2-1	52,45	51,34	95,65	116,66	24,81
B-5-1	57,82	50,79	94,49	117,27	26,47
Promedio	52,38	50,44	95,27	116,26	26,06
Desviación	5,47	1,12	0,67	1,26	1,10

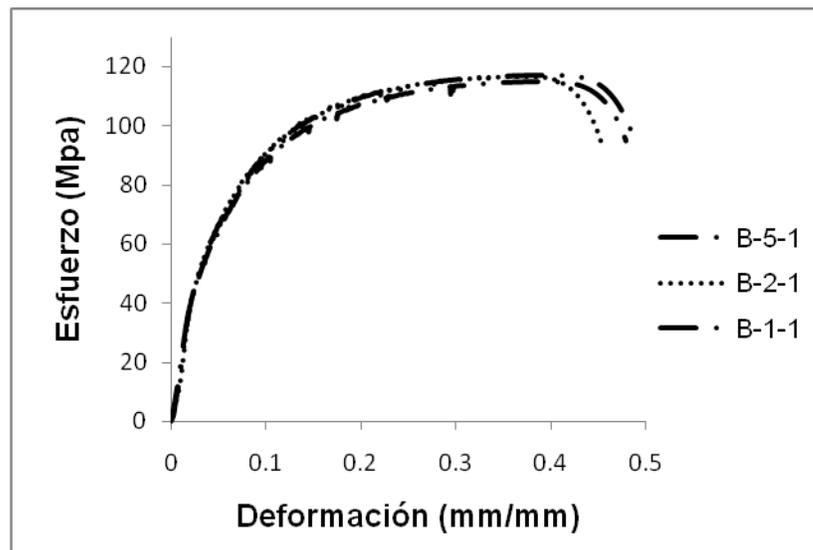
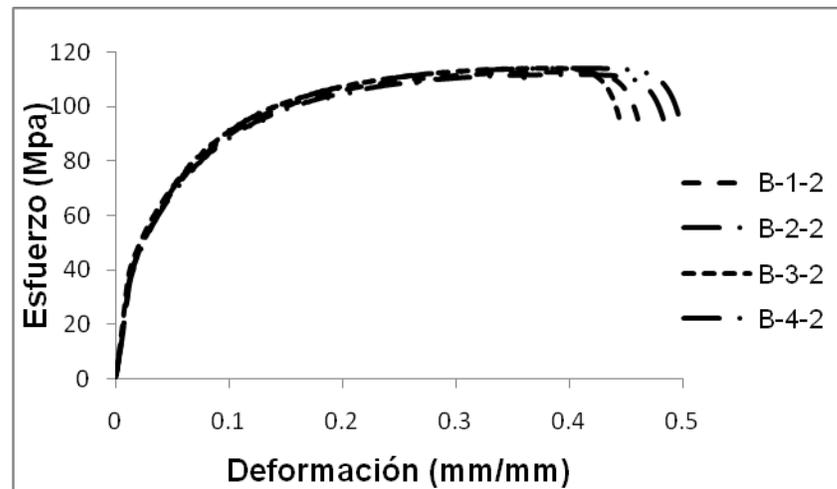


Figura 4.4 Curvas de esfuerzo vs. deformación de las muestras tratadas térmicamente a 550°C y con espesor de 6mm, ensayadas a tracción

**Tabla 4.6** Propiedades mecánicas obtenidas mediante el ensayo de tracción a muestras tratadas térmicamente, T=550°C y un espesor de 3mm

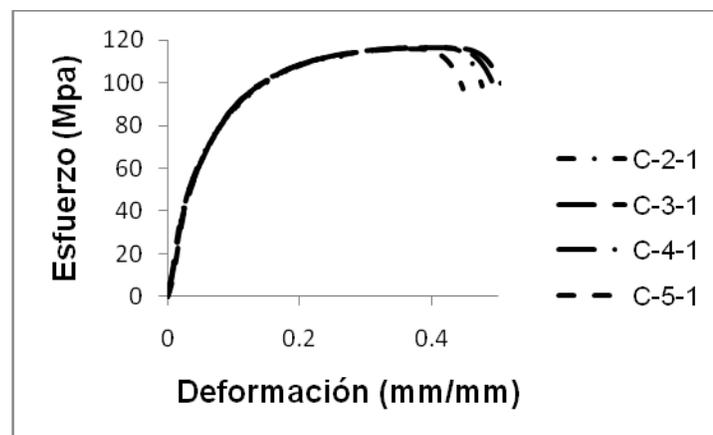
Probeta	RA (%)	S <sub>0,2%</sub> (Mpa)	S <sub>r</sub> (Mpa)	S <sub>u</sub> (Mpa)	elong(%)
B-1-2	54,48	49,37	95,04	112,93	24,64
B-2-2	55,57	49,41	97,92	113,97	26,36
B-3-2	55,65	49,64	97,12	114,12	24,24
B-4-2	63,07	49,44	94,96	111,73	25,54
Promedio	57,20	49,47	96,26	113,19	25,20
Desviación	3,95	0,12	1,49	1,11	0,95



**Figura 4.5** Curvas de esfuerzo vs. deformación de las probetas tratadas térmicamente a 550°C y con espesor de 3mm, ensayadas a tracción

**Tabla 4.7** Propiedades mecánicas obtenidas mediante el ensayo de tracción a muestras tratadas térmicamente, T=450°C y un espesor de 6mm

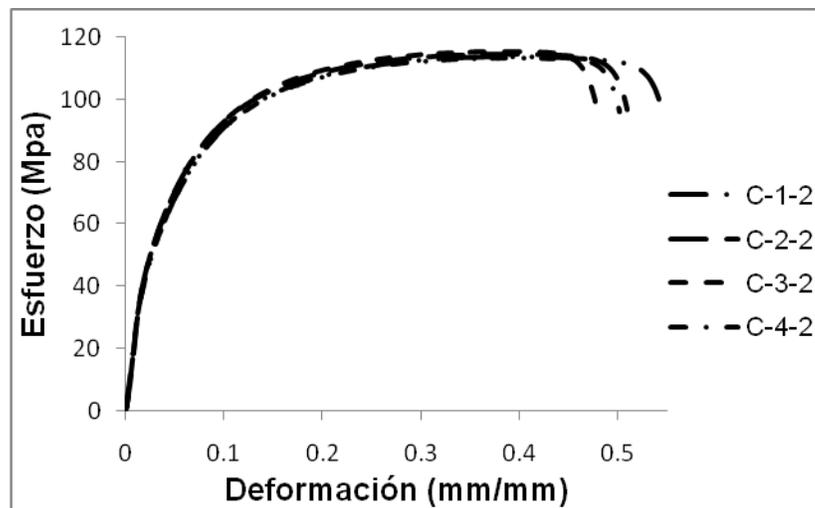
Probeta	RA (%)	$S_{0,2\%}$ (Mpa)	$S_r$ (Mpa)	$S_u$ (Mpa)	elong(%)
C-2-1	53,40	50,10	99,10	116,50	24,36
C-3-1	54,65	50,26	96,37	116,50	26,14
C-4-1	50,86	50,76	98,43	116,21	26,25
C-5-1	53,93	51,40	98,59	115,96	25,21
Promedio	53,21	50,63	98,12	116,29	25,49
Desviación	1,65	0,59	1,20	0,26	0,89



**Figura 4.6** Curvas de esfuerzo vs. deformación de las muestras tratadas térmicamente a 450°C y con espesor de 6mm, ensayadas a tracción

**Tabla 4.8** Propiedades mecánicas obtenidas mediante el ensayo de tracción a muestras tratadas térmicamente,  $T=450^{\circ}\text{C}$  y un espesor de 3mm

Probeta	RA (%)	$S_{0,2\%}$ (Mpa)	$S_r$ (Mpa)	$S_u$ (Mpa)	elong(%)
C-1-2	58,23	49,69	90,07	113,57	29,73
C-2-2	58,25	50,42	93,95	114,42	29,18
C-3-2	57,27	50,20	94,40	115,25	26,85
C-4-2	65,32	49,67	95,97	113,44	28,57
Promedio	59,77	49,99	93,59	114,17	28,58
Desviación	3,73	0,37	2,51	0,84	1,25



**Figura 4.7** Curvas de esfuerzo vs. deformación de las muestras tratadas térmicamente a  $450^{\circ}\text{C}$  y con espesor de 3mm, ensayadas a tracción

**Tabla 4.9** Promedio de las propiedades mecánicas de las condiciones en estudio

Probeta	RA (%)	$S_{0,2\%}$ (Mpa)	$S_r$ (Mpa)	$S_u$ (Mpa)	e (%)
D-X-1	43.10	83.84	126.55	140.22	22.81
A-X-1	51.04	48.70	98.11	121.25	23.73
A-X-2	58.74	48.24	96.21	115.27	24.63
B-X-1	52.38	50.44	95.27	116.26	26.06
B-X-2	57.20	49.47	96.26	113.19	25.20
C-X-1	53.21	50.63	98.12	116.29	25.49
C-X-2	59.77	49.99	93.59	114.17	28.58

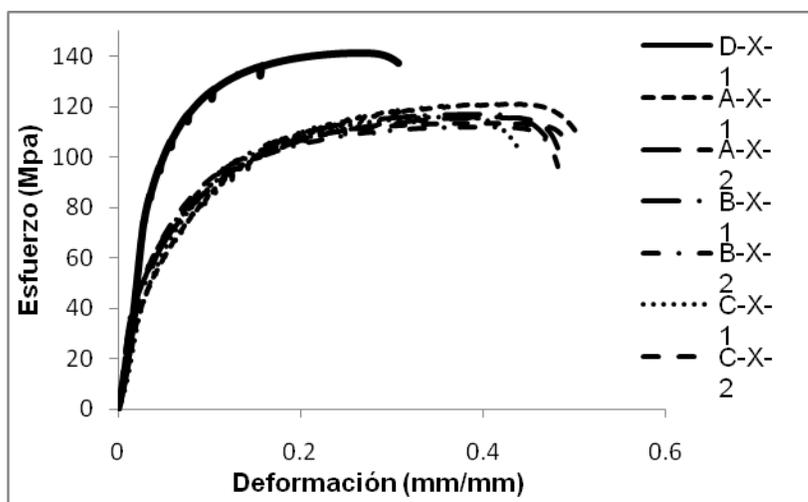


Figura 4.8 Curvas comparativa de esfuerzo vs deformación de las muestras, ensayadas a tracción.

### 4.3 Ensayo de Dureza

La tabla 4.10 representa los valores de dureza Brinell para cada una de las muestras, finalmente en la tabla 4.11 se observan los valores promedios de dureza para cada una de las condiciones de estudio.

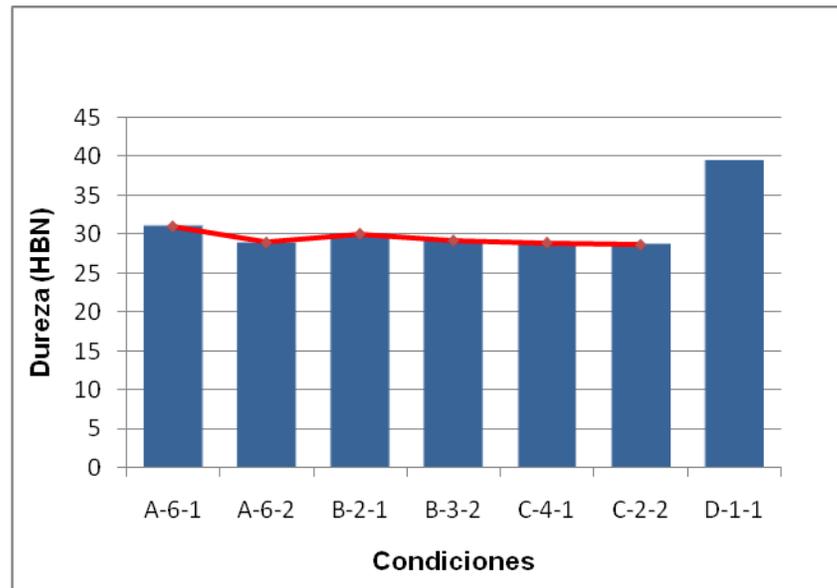
La figura 4.9 representa la variación de los promedios para cada una de las condiciones de estudio.

Tabla 4.10 Dureza de las muestras en las distintas condiciones de estudio

Probeta	1	2	3	4	5	Promedio	Desviación estándar	
D-1-1	3,9	4	3,9	4	3,9	-	-	Diámetro (mm)
	40,2	38,1	40,2	38,1	40,2	39,36	1,15	Dureza (HBN)
A-6-1	4,5	4,35	4,7	4,1	4,5	-	-	Diámetro (mm)
	29,8	32	27,1	36,2	29,8	30,98	3,39	Dureza (HBN)
A-6-2	4,5	4,4	4,6	4,6	4,7	-	-	Diámetro (mm)
	29,8	31,2	28,4	28,4	27,1	28,98	1,57	Dureza (HBN)
B-2-1	4,6	4,5	4,5	4,4	4,4	-	-	Diámetro (mm)
	28,4	29,8	29,8	31,2	31,2	30,08	1,17	Dureza (HBN)
B-3-2	4,5	4,6	4,5	4,6	4,5	-	-	Diámetro (mm)
	29,8	28,4	29,8	28,4	29,8	29,24	0,77	Dureza (HBN)
C-4-1	4,5	4,6	4,6	4,5	4,6	-	-	Diámetro (mm)
	29,8	28,4	28,4	29,8	28,4	28,96	0,77	Dureza (HBN)
C-2-2	4,7	4,6	4,7	4,4	4,5	-	-	Diámetro (mm)
	27,1	28,4	27,1	31,2	29,8	28,72	1,78	Dureza (HBN)

**Tabla 4.11** Dureza promedio por condición de estudio

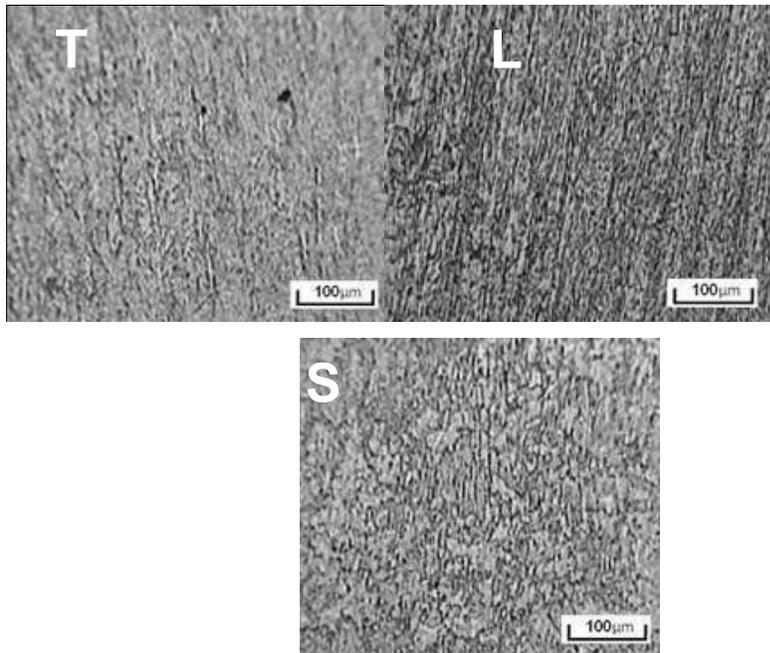
Condición	A-6-1	A-6-2	B-2-1	B-3-2	C-4-1	C-2-2	D-1-1
Dureza (HBN)	30,98	28,98	30,08	29,24	28,96	28,72	39,36



**Figura 4.9** Gráfica demostrativa de los promedios de dureza por condición, y curva de tendencia de las condiciones tratada térmicamente

#### 4.4 Microscopía Óptica

En la figura 4.10 se presentan las vistas de la muestra en estado original, en la figura 4.11 se aprecian fotomicrografías de la probeta tratada a 600°C sin trabajo en frío. Las muestras tratadas a 600°C y trabajadas en frío se observan en la figura 4.12, seguidamente las figuras 4.13 y 4.14 se dan a conocer las vistas del material tratado térmicamente a 550°C sin trabajo en frío y con 50% de trabajo en frío. Para finalizar, en las figuras 4.15 y 4.16 se ubican las muestras tratadas térmicamente a 450°C sin y con trabajo en frío. Cabe destacar que todas las vistas antes mencionadas se encuentran a un aumento de 100X.



**Figura 4.10** Microestructura de la muestra en estado original a 100X

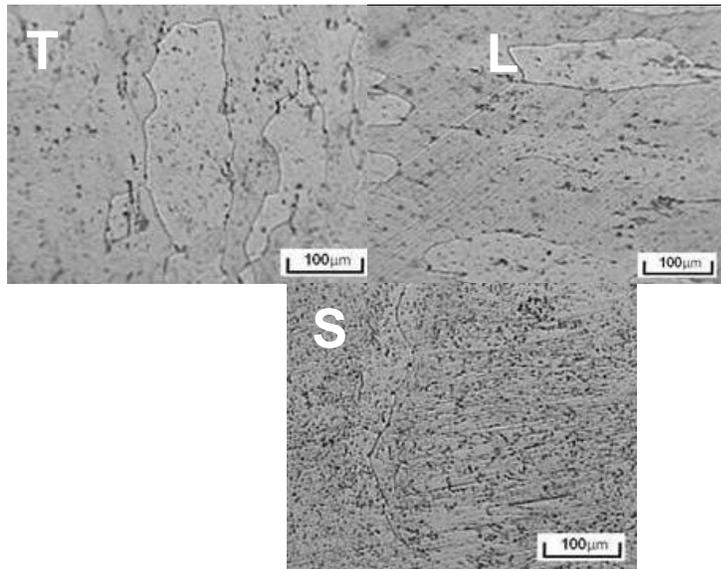


Figura 4.11 Microestructura de la muestra tratada a 600°C sin trabajo en frío a 100X

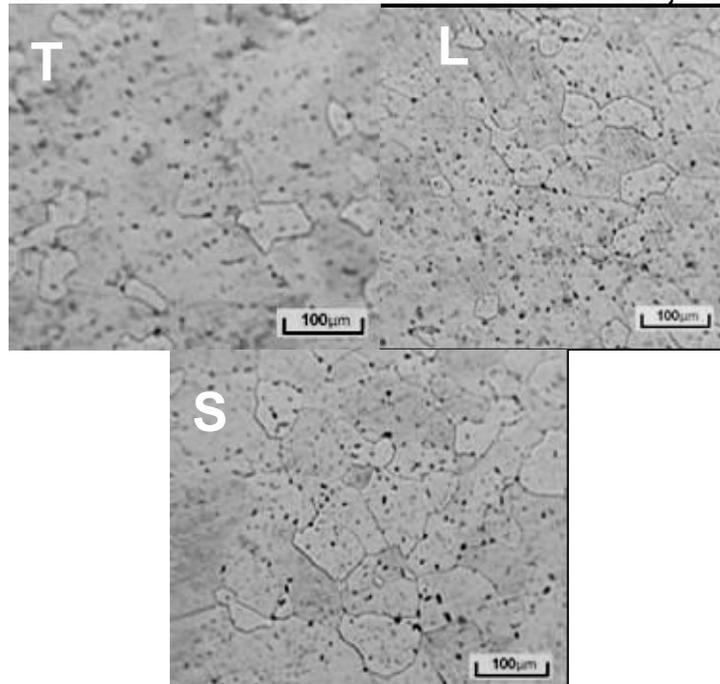
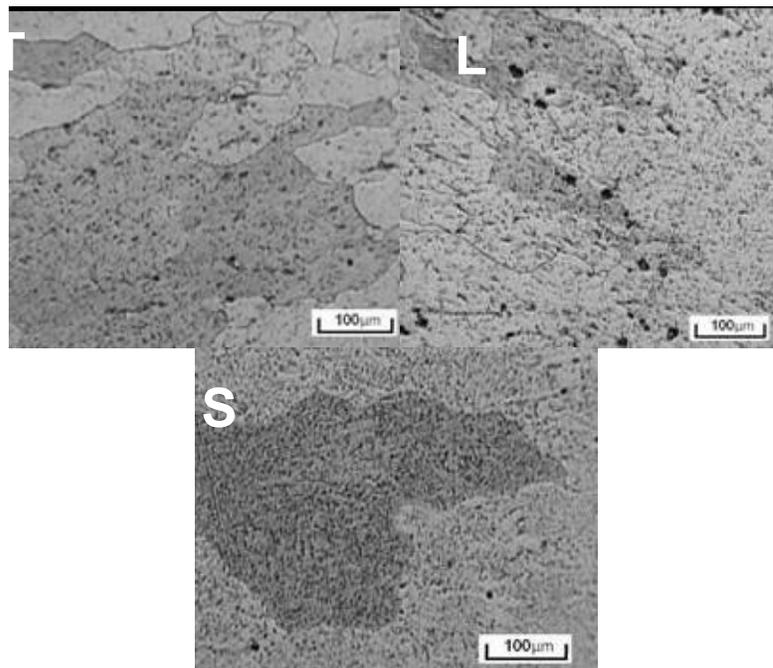
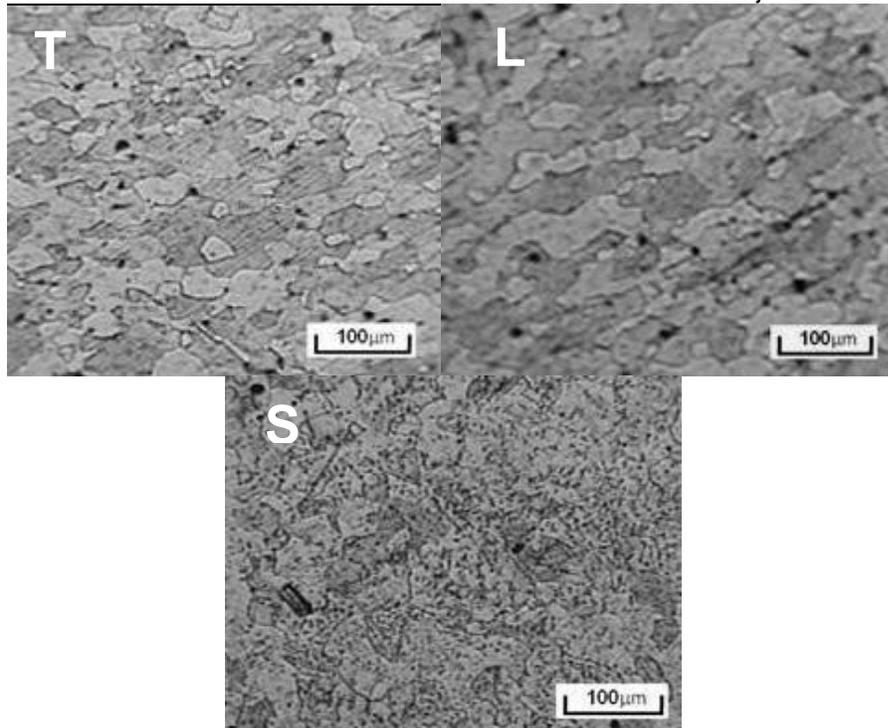


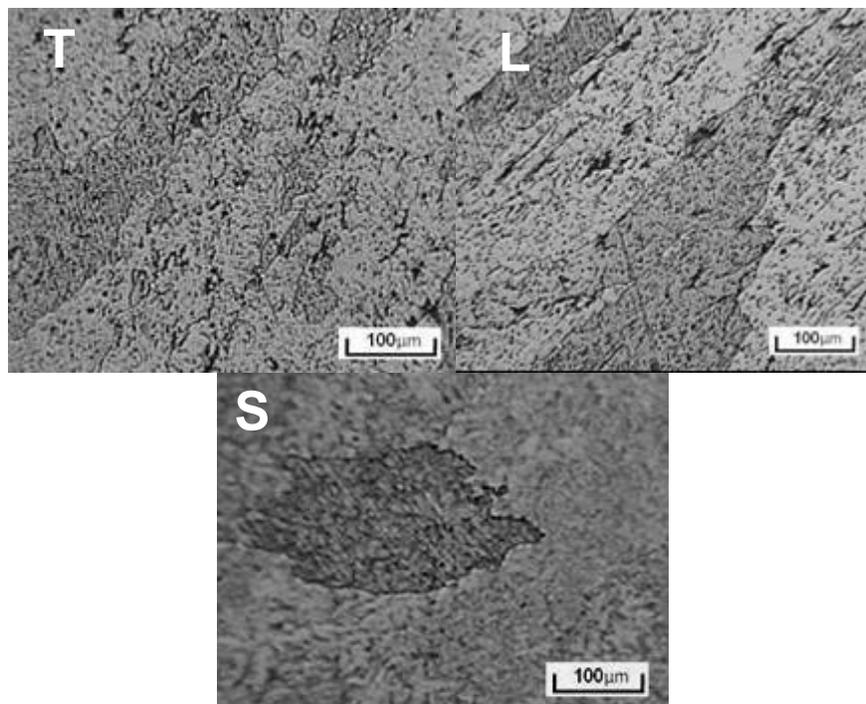
Figura 4.12 Microestructura de la muestra tratada térmicamente a 600°C trabajada en frío a 100X



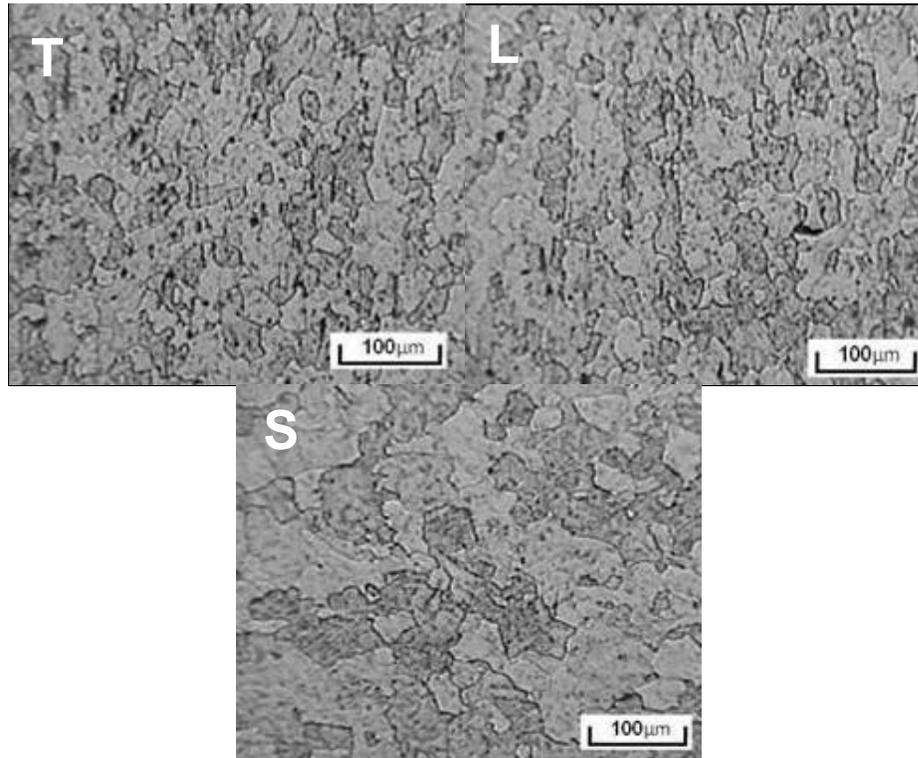
**Figura 4.13** Microestructura de la muestra tratada a 550°C sin trabajo en frío a 100X



**Figura 4.14** Microestructura de la muestra tratada térmicamente a 550°C y trabajada en frío a 100X



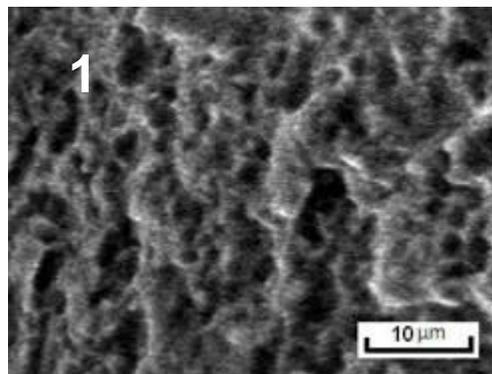
**Figura 4.15** Microestructura de la muestra tratada térmicamente a 450°C sin trabajo en frío a 100X



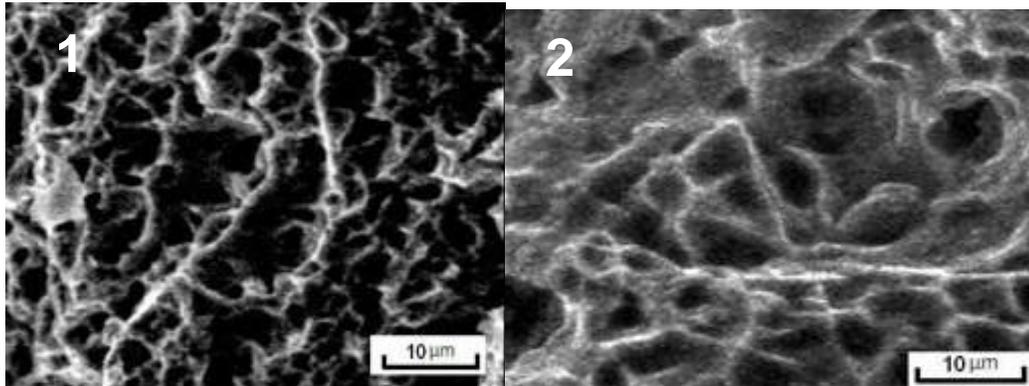
**Figura 4.16** Microestructura de la muestra tratada térmicamente a 450°C y trabajada en frío a 100X

## 4.5 Fractografía

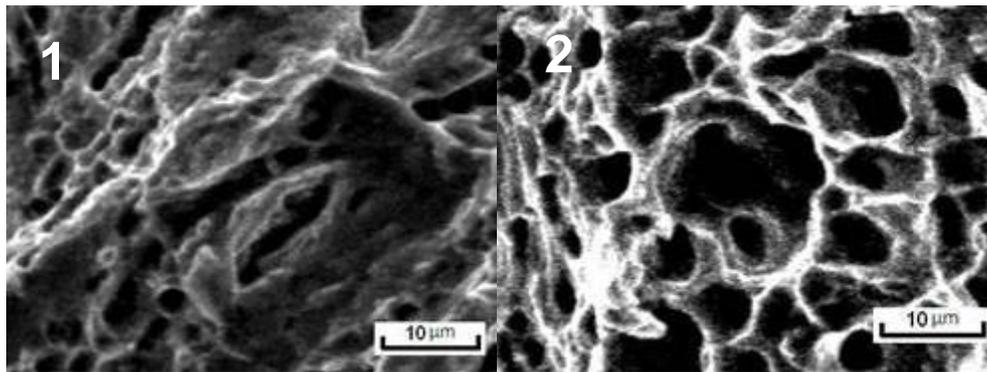
En la figura 4.17 se presenta la superficie de fractura de la muestra en condición original, seguidamente en las figuras 4.18, 4.19 y 4.20 se aprecia la zona de fractura de las probetas tratadas térmicamente a las diferentes temperaturas de homogenizado.



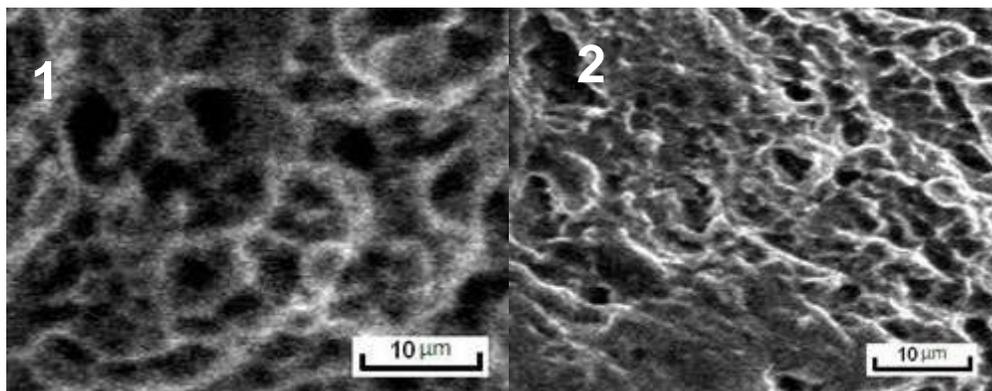
**Figura 4.17** superficie de fractura de la muestra en estado de entrega



**Figura 4.18** Superficie de fractura de las muestras tratadas térmicamente a 600°C



**Figura 4.19** Superficie de fractura de las muestras tratadas térmicamente a 550°C



**Figura 4.20** Superficie de fractura de las muestras tratadas térmicamente a 450°C

# CAPÍTULO 5

## *Análisis de Resultados*

---

---

### **5.1 Ensayo de Tracción**

Los ensayos de tracción realizados en la aleación de aluminio AA8011 permitieron conocer algunas de sus propiedades mecánicas y valores particulares, tales como, esfuerzo de fluencia, esfuerzo último, esfuerzo de ruptura, % reducción de área y % de elongación.

Los valores antes mencionados se encuentran en las tablas 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8, así como también los promedios de cada uno de estos (tabla 4.9).

#### **5.1.1 Material en estado de entrega**

Para la condición en estado de entrega del material, los valores característicos de las probetas ensayadas se comportan de manera similar, es por ello que la desviación estándar resultante son valores bastantes bajos, esto se puede observar en la figura 4.1.

La aleación en estado original, arrojó los siguientes valores promedios de esfuerzos: fluencia 83,84 Mpa, último 140,22 Mpa y ruptura 126,55 Mpa. Además la probeta sufrió un porcentaje de elongación de 22,81.

#### **5.1.2 Material homogenizado a 600°C**

En la gráfica esfuerzo ingenieril versus deformación unitaria de la figura 4.2, se observan las curvas para las probetas ensayadas sin trabajo en frío previo, presentando un comportamiento bastante similar entre ellas, en donde se aprecia que las propiedades mecánicas obtenidas son muy

cercanas, resultando desviaciones pequeñas que se dan a conocer en la tabla 4.3.

En promedio se tiene un esfuerzo de fluencia igual a 48,70 MPa. Se obtuvo en promedio un esfuerzo último de 121,25 MPa y esfuerzo de ruptura de 98,11MPa. El porcentaje de alargamiento a la ruptura fue 23,73.

Al igual que las muestras sin trabajo en frío, las muestras con trabajo en frío, presentaron comportamiento similar, obteniéndose en promedio las siguientes propiedades mecánicas: esfuerzo de fluencia 48,24 MPa, esfuerzo último de 115,27 MPa y esfuerzo de ruptura de 96,21MPa. Adicional a esto, se obtuvo un porcentaje de alargamiento promedio de 24,63.

### **5.1.3 Material homogenizado a 550°C**

Al material tratado térmicamente a 550°C, se le obtuvieron los valores de  $S_{0,2\%}$ ,  $S_u$  y  $S_r$  del ensayo de tracción, apreciándose un comportamiento prácticamente invariable de sus propiedades mecánicas, a pesar de haberle aplicado o no una deformación en frío, pudiéndose apreciar que la desviación estándar resultante son valores pequeños.

Las muestras sin trabajo en frío, presentaron un valor de esfuerzo de fluencia promedio 50,44 Mpa. El esfuerzo último promedio 116,26 Mpa y esfuerzo de ruptura de 95,27. Por otra parte las probetas sufrieron un alargamiento promedio del 26,06% con respecto a la longitud original. De igual manera las muestras con trabajo en frío, presentaron valores aproximadamente iguales que las muestras sin deformación en frío previa, obteniéndose en promedio: esfuerzo de fluencia 49,47 MPa, esfuerzo último de 113,49 MPa y esfuerzo de ruptura de 96,26. Además presento un porcentaje de alargamiento de 25,20. En las tablas 4.5 y 4.6 quedan evidenciados los valores anteriormente mencionado.

#### **5.1.4 Material homogenizado a 450°C**

De las muestras estudiadas bajo tratamiento térmico a 450°C, se obtuvieron valores bastantes cercanos en las propiedades mecánicas. Sin importar la aplicación o no del trabajo en frío.

En las muestras sin la aplicación del trabajo en frío se obtuvieron valores promedios de: esfuerzo de fluencia 50,63 MPa, esfuerzo último 116,29 MPa y esfuerzo de ruptura 98,12 MPa. De igual manera las muestras con trabajo en frío presentaron valores muy cercanos a los de las muestras sin trabajo en frío previo, obteniéndose en promedio: esfuerzo de fluencia 49,99 MPa, esfuerzo último 114,17 MPa y esfuerzo de ruptura 93,59 MPa. Además presentaron porcentaje de elongación aproximadamente igual, siendo 25,49 para las muestras sin trabajo en frío y 28,58 para las que si se trabajaron frío.

En las tablas 4.7 y 4.8 se presentan los valores promedios de las propiedades mecánicas indicadas anteriormente, obtenidas del ensayo de tracción para las muestras tratadas térmicamente sin trabajo en frío y en presencia del mismo, respectivamente.

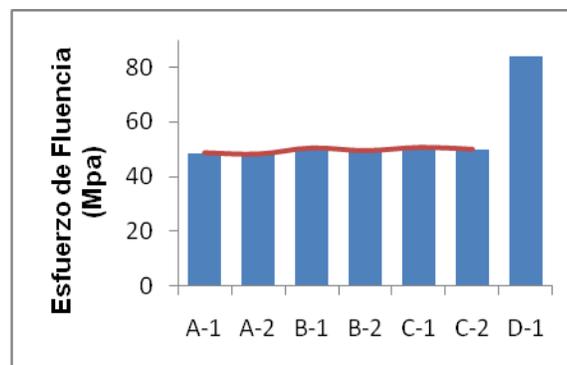
#### **5.1.5 Comparación de las muestras sometidas a tratamiento térmico a las diferentes temperaturas (600°C, 550°C y 450°C)**

Los resultados de las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio AA8011, presentan un comportamiento relativamente constante para las condiciones en la que fue estudiado este material, debido a que los valores obtenidos fueron bastante cercanos sin importar la temperatura a las que fueron sometidas las probetas. A excepción del material en condición de entrega que presento valores superiores en sus propiedades mecánicas.

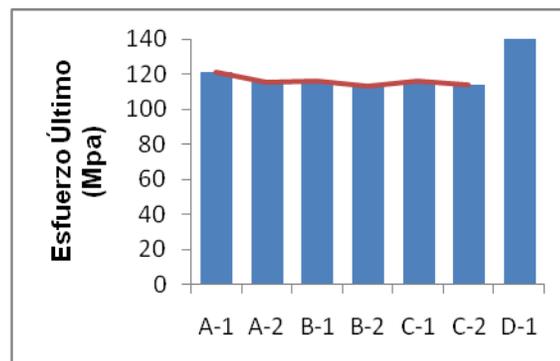
En la figura 5.1 se observa la pequeña diferencia que existe en el esfuerzo de fluencia promedio, entre las muestras tratadas térmicamente con y sin deformación en frío, con valores comprendidos entre 48,24 MPa y 50,63 MPa, a excepción de las probetas en estado original que presenta un

esfuerzo de fluencia muy superior de 83,84 MPa. De igual manera en la figura 5.2 se aprecia la poca diferencia que presenta el esfuerzo último promedio, entre las probetas tratadas térmicamente, exhibiendo valores comprendidos entre 113,19 MPa y 121,25 MPa, en cambio las muestras en estado original presentaron un esfuerzo último promedio de 140,22 MPa.

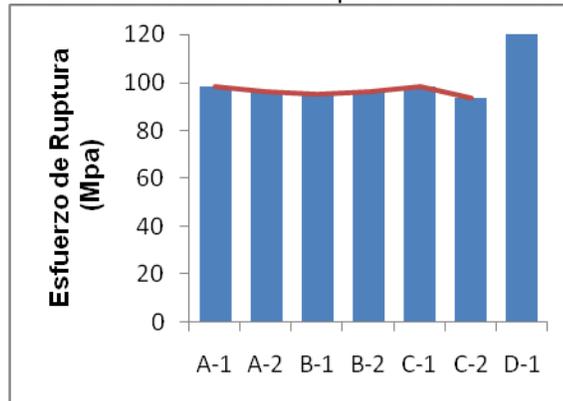
En la figura 5.3 se presentan los valores promedios del esfuerzo de ruptura, observándose un comportamiento lineal y constante en las muestras tratadas térmicamente, con valores comprendidos entre 93,59 MPa y 98,12 MPa, a diferencia del material en estado de entrega que presenta un valor superior de 126,55 Mpa.



**Figura 5.1** Comportamiento del esfuerzo de fluencia para las distintas condiciones de estudio



**Figura 5.2** Comportamiento del esfuerzo último para las distintas condiciones de estudio



**Figura 5.3** Comportamiento del esfuerzo de ruptura para las distintas condiciones de estudio

Al analizar y comparar las propiedades mecánicas obtenidas para las distintas condiciones tratadas térmicamente (600°C, 550°C y 450°C) con respecto a las muestras en condición de entrega, se aprecia una disminución en las propiedades mecánicas corroborando así las características de un material no endurecible, tal como lo es la aleación de aluminio AA8011.

Al observar las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se logra evidenciar que las propiedades mecánicas se mantienen constantes, en las condiciones donde el material fue sometido a tratamiento térmico y en presencia o no de trabajo en frío, esto se debe a que se superó la temperatura de recristalización para estas condiciones previas del material y tiempo del tratamiento térmico.

## 5.2 Ensayo de Dureza

Al realizar las indentaciones en las diferentes muestras para obtener el valor de dureza por cada condición, se determinó mediante el análisis de la tabla 4.10 que en la condición original (D-1-1) se lograron los mayores valores de dureza, alcanzando el valor máximo de 40,20 HBN, de igual manera se observa mediante la figura 4.9 la curva de tendencia de la dureza para las distintas condiciones estudiadas, en donde se aprecia una relación aproximadamente lineal y constante, destacando que esta relación solamente se presenta para las condiciones tratadas térmicamente, y con la

aplicación o no de trabajo en frío, obteniendo como valor máximo entre ellas 30,98 HBN.

Al comparar los valores obtenidos del material tratado térmicamente y el material en estado de entrega se nota claramente que el efecto del tratamiento térmico sobre el material produce una clara disminución en la dureza de este aluminio. Cabe destacar que ello ocurre independientemente de la temperatura con la que se haya trabajado (600°C, 550°C y 450°C) y el grado de deformación (0% y 50%) en la cual se encuentre el material. Por lo tanto, se puede decir que el ablandamiento del material ocurre independientemente de la temperatura del tratamiento térmico, para el rango de temperaturas evaluadas.

## **5.3 Microscopia Óptica**

### **5.3.1 Caracterización del material en condición original.**

En la figura 4.10 en la sección transversal de la muestra (imagen T) se aprecia una estructura dendrítica, la cual pudo haber sido producto del enfriamiento rápido en el proceso de colada continua (etapa de solidificación), con presencia de segregados (Al-Fe-Si). Para la sección longitudinal (imagen L), se observan pequeños granos alargados, producto de la deformación sufrida durante el proceso de colada continua. Se observa presencia de estructura dendrítica producto del rápido enfriamiento en la solidificación del material. Y para la sección superficial (imagen S), al igual que en las otras secciones de la muestra, se aprecia claramente una estructura dendrítica.

### **5.3.2 Material en estado de entrega homogenizado a 600°C**

En la sección transversal (imagen T) de la muestra de la figura 4.11, se aprecia la presencia de granos gruesos, de igual manera se visualiza perfectamente los contornos de grano, así mismo se observa la desaparición total de las dendritas presentes e indicadas con anterioridad en las muestras

proveniente del proceso de colada continua. Las partículas negras que se observan corresponden a precipitados. En esta microestructura se nota un indicio de recuperación del material.

En la sección longitudinal, al igual que en la sección transversal de la muestra (imagen T), se aprecia la presencia de granos gruesos, de igual forma se visualiza perfectamente los contornos de grano, también se observa la desaparición total de las dendritas presentes. Y representa una muestra con indicio de recuperación.

La sección superficial de la muestra (imagen S), conserva claramente su estructura dendrítica con alta presencia de precipitados de  $Al_3Fe$ . [Ney 1998]

### **5.3.3 Material homogenizado a 600°C, con 50% de trabajo en frío**

En la figura 4.12 del capítulo anterior se observan las distintas fotomicrografías, correspondientes a las secciones longitudinal, transversal y superficial de las muestras. En todas las secciones se exhiben granos finos y equiaxiales, adicionalmente se visualiza la presencia de precipitados de  $Al_3Fe$ .

### **5.3.4 Material en estado de entrega homogenizado a 550°C**

Al estudiar las distintas fotomicrografías de la muestra (figura 4.13), se observa que tanto en la sección longitudinal y transversal de la muestra (imagen L y T), la presencia de pequeños granos equiaxiales, situados hacia la periferia de la muestra, esto debido a la dirección y sentido en que ocurre la transferencia de calor, ya que el mismo se proporciona desde afuera hacia el centro de la muestra. Además se aprecia la presencia de precipitados de  $Al_3Fe$ .

En la región superficial (imagen S), se conserva la presencia de una estructura dendrítica, con baja presencia de precipitados de  $Al_3Fe$ .

### **5.3.5 Material homogenizado a 550°C, con 50% de trabajo en frío**

Al evaluar la figura 4.14, se identifica que tanto para la sección transversal (T) como longitudinal (L) del espécimen, una estructura de grano con granos equiaxiales, sin embargo se aprecian algunos granos alargados. Adicionalmente se aprecia una baja cantidad de precipitados de  $Al_3Fe$ .

En la región superficial de la muestra ensayada (imagen S), se observa una estructura con tendencia a la formación de granos equiaxiales, con baja presencia de precipitados de  $Al_3Fe$ .

### **5.3.6 Material en estado de entrega homogenizado a 450°C,**

En la figura 4.15 se aprecian las fotomicrografías de la muestra, en región transversal del espécimen (imagen T), se observa una estructura con granos alargados, en proceso de recuperación, adicional a ello se identifica la precipitación de Al-Fe-Si. [Ney 1998].

De igual manera, en la superficie longitudinal (imagen L), se observan los granos alargados y se visualiza gran presencia de precipitados.

En el perfil superficial de la muestra (imagen S), se observa la presencia de una estructura dendrítica, producto del desequilibrio térmico en la etapa de solidificación, además de ello, se nota la presencia de precipitado Al-Fe-Si.

### **5.3.7 Material homogenizado a 450°C, con 50% de trabajo en frío**

Las imágenes relacionadas a esta condición se muestran en la figura 4.16, visualizando en la sección transversal (imagen T) y en la sección longitudinal (imagen L), una estructura con tendencia a la formación de granos equiaxiales. Además se observa la presencia de precipitados de Al-Fe-Si. [Ney 1998].

En la sección superficial (imagen S), de igual manera se observa la tendencia a la formación de granos equiaxiales, pero en menor proporción

que en las secciones longitudinal y transversal. También se exterioriza la presencia de precipitados de Al-Fe-Si.

### **5.3.8 Comparación general de la microestructura de las distintas condiciones de trabajo.**

En las distintas fotografías estudiadas para la condición original, se corrobora la presencia de la estructura segregada dendrítica, la cual se genera debido al desequilibrio durante el enfriamiento en el proceso de solidificación, siendo en la práctica la velocidad de enfriamiento mucho mayor a la velocidad ideal de enfriamiento, y es por ello que se produce una distribución no homogénea del soluto en el sólido. En esta condición se aprecia la presencia de granos alargados, obtenidos gracias a la deformación sufrida durante el proceso de colada continua.

Debido a esto es que se estudiaron las otras condiciones de estudio, de la cual se obtuvo que:

Para las muestras tratadas térmicamente a 600° C con o sin trabajo en frío previo, se observa una estructura granular con granos equiaxiales, bien formados, y lográndose apreciar el borde de grano; adicional a ello producto de la permanencia del material en el horno se observa precipitado de  $Al_3Fe$ . Es de resaltar que para la muestra con trabajo en frío previo se aprecian granos de menor tamaño (figura 4.12), lo mismo pudo haber sido producto de la recristalización de nuevos granos, debido a la energía absorbida por el material durante el trabajo en frío.

En las muestras homogenizadas a 550°C, sin importar el grado de deformación, se observó una estructura granular, presentándose algunos granos equiaxiales y otros en proceso de recristalización. Además, al igual que las muestras tratadas a 600°C se presenta la precipitación de  $Al_3Fe$ . De igual forma se observa la presencia de granos de menor tamaño en la muestra deformada previamente (figura 4.14).

Cabe recalcar que al permanecer las muestras en el horno a 450°C durante 16 horas, se presenta para la muestra sin trabajo en frío (figura 4.15), aún una estructura con granos alargados proveniente de la colada y con tendencia a la recuperación, mas no así en la muestra con trabajo en frío previo que presentó algunos granos equiaxiales, esta diferencia pudo haber sido producto a la recristalización de nuevos granos debido a la energía acumulada en el proceso de trabajo en frío. Estas muestras también presentaron precipitados de Al-Fe-Si.

Ya para finalizar es de resaltar que las muestras tratadas térmicamente, sin trabajo en frío, exhiben la conservación de la estructura dendrítica en la sección superficial, destacando que en menor proporción que lo observado en dicha sección del material en condición original.

#### **5.4 Fractografía**

Las fotografías tomadas a las superficies fracturadas producto del ensayo de tracción, permiten distinguir el mecanismo de fractura presentado.

En las distintas imágenes (figuras 4.17, 4.18, 4.19 y 4.20) tomadas por condición de estudio se observó la presencia de depresiones o cavidades, mejor conocidas como hoyuelos o dimples, resultado característico de un mecanismo de fractura dúctil, representado por la apariencia de una coloración negra (zona opaca).

En la superficie de fractura de la condición original, (figura 4.17), se observa la presencia de pequeños hoyuelos, y apariencia oscura. Adicional a ello, se nota la formación de microhuecos en la misma dirección del desgarre.

Al igual que en la condición original para las muestras tratadas térmicamente a 600°C (figura 4.18) (imagen 1) se visualiza la presencia de pequeños hoyuelos, con la coloración oscura. Para la muestra sin trabajo en

frío previo se presenta la región con mayor cantidad de hoyuelos y dispuestos en la misma dirección del desgarre del espécimen ensayado.

Para las superficies de fractura de las muestras ensayadas después del previo tratamiento térmico a 550°C, se observan los hoyuelos de mayor tamaño.

Al estudiar las superficies de las muestras tratadas a 450°C, se aprecia una estructura muy similar a la de la superficie en condición original, con presencia de cavidades formadas por microhuecos, en las mismas se aprecian la creación de los hoyuelos en el mismo sentido del desgarre.

### **5.5 Relación de las propiedades mecánicas con los distintos estudios realizados a las muestras.**

Para comparar los resultados de los ensayos de tracción, dureza y la estructura del material con el análisis de la superficie de fractura se tiene que:

En la condición original se obtienen diferentes valores de las propiedades mecánicas del material, con respecto a las muestras tratadas térmicamente. No obstante el mismo presenta mayor resistencia a ser penetrado y menor ductilidad que las muestras tratadas térmicamente, esto se puede corroborar mediante la observación de la superficie de fractura con la presencia de mayor cantidad de dimples claramente formados, y los valores de porcentaje de elongación.

Adicionalmente se exhibe en su microestructura el fenómeno de segregación dendrítica, el cual se presenta debido al rápido enfriamiento del material durante la colada, proporcionando una última fase de solidificación sobre los contornos de granos, y generándose sobre estos contornos posibles planos de ruptura.

Al comparar las propiedades mecánicas de las muestras tratadas térmicamente, se evidencia la igualdad en sus propiedades, esto

independientemente de la temperatura del tratamiento y de la presencia o no del trabajo en frío. Lo mismo se observa al comparar la resistencia del material a ser penetrado, en las condiciones antes mencionadas. Corroborando así las características principales de un material después de haber superado la temperatura de recristalización.

De igual forma se identificó que independientemente de la temperatura del tratamiento térmico, el mismo le proporciona un ablandamiento al material quedando evidenciado en la figura 4.9, en donde se aprecian los valores de dureza promedio y se presenta la línea de tendencia del mismo, arrojando un comportamiento aproximadamente lineal y constante ya que sus valores son bastante similares.

En el estudio microscópico se observaron ciertas diferencias, en las muestras tratadas a 600°C, se visualiza la recuperación completa del material, pudiéndose apreciar completamente los granos con forma equiaxial, cabe destacar que para la muestra trabajada en frío (figura 4.12) se aprecian granos de menor tamaño, al contrario de los espécimen sin trabajo en frío (figura 4.11) que presenta granos grandes. Mientras que la muestra con tratamiento a 550°C y deformación previa presenta algunos granos equiaxiales y otros alargados, caso contrario a la muestra sin trabajo en frío donde se observan granos alargados.

Para las muestras con permanencia en el horno a 450°C y trabajo en frío, se aprecian granos alargados. En cambio para la muestra con trabajo en frío se observan algunos granos equiaxiales.

Con respecto a la superficies de fractura se puede agregar que en general las fotografías evidenciaron que debido a la presencia de hoyuelos el mecanismo de fractura es el correspondiente a un material dúctil, destacando que en la muestra a 450°C (figura 4.20) y con trabajo en frío previo (vista 2), presentó poco desnivel en la superficie, además se aprecia la disposición de los hoyuelos en la misma dirección en que se produjo el desgarre,

definiéndose la misma sensiblemente más dúctil que las otras condiciones, tal como se ve evidenciado en el valor de dureza, así como en el porcentaje de alargamiento.

Después de evaluada las distintas condiciones de estudio, se aprecia que únicamente en el material tratado térmicamente a 600°C se observa (figura 4.11 y 4.12) una restauración completa de la microestructura, ya que es en esta donde se aprecia una microestructura en la cual los granos están totalmente equiaxiales, a diferencia de las demás condiciones estudiadas, es decir, que para las temperaturas de 550°C y 450°C se podría aumentar el tiempo de permanencia en el horno para verificar si se logra alcanzar dicha recuperación.

# CAPÍTULO 6

## *Conclusiones y Recomendaciones*

---

---

### **Conclusiones**

Al tratar térmicamente el material a distintas temperaturas (600, 550, y 450°C) durante 16 horas, se obtuvieron variaciones poco relevantes de las propiedades mecánicas del material ( $S_{0,2\%}$ ,  $S_u$  y  $S_r$ ), solo se observó una disminución en ellas, con respecto a la muestra en estado original.

En los resultados del ensayo de dureza se observa que el material en estado de entrega ofrece mayor resistencia a ser penetrado que el material tratado térmicamente, independientemente de la temperatura del tratamiento y del grado de deformación previa que posea. Además se comprobó que no existe variación de la dureza para las condiciones con tratamiento térmico de homogenización.

Al apreciar las fotografías de la microestructura del material expuesto a 600°C, se obtuvo una recuperación completa de su microestructura, presentando granos equiaxiales dispuestos en gran espacio de las secciones estudiadas.

Mediante el análisis de la superficie de fractura se demostró que el material estudiado con o sin tratamiento térmico, tiende a ser dúctil, presentando claramente depresiones o cavidades, mejor conocidas como hoyuelos (dimples), características principales de un mecanismo de fractura dúctil.

Se logró evidenciar que no es posible disminuir la temperatura de homogenización de 600°C por un periodo de 16 horas de la aleación de

aluminio AA8011, debido básicamente a que no se presentó una recuperación completa de su microestructura al reducir la temperatura del tratamiento a 550°C y 450°C.

Con el análisis de la microestructura se obtuvo que en cada condición estudiada, el material con trabajo en frío previo presentó una mejor microestructura que el material sin trabajo en frío, debido a que en las mismas se aprecia granos equiaxiales de menor tamaño, corroborando el efecto de recristalización de nuevos granos, producto de la energía interna absorbida por el material al ser trabajado en frío.

Se corrobora que el material en estudio presenta una temperatura de recristalización inferior a 450°C para un periodo de tiempo de permanencia en el horno de 16 horas, debido a que en las diferentes temperaturas evaluadas en esta investigación (600°C, 550°C y 450°C), y distintos grados de deformación en frío previo (0% y 50%), se obtuvo una tendencia constante en las propiedades mecánicas.

Al evaluar el material sin trabajo en frío previo se observó que en el mismo se presentó el efecto de recristalización, constatando que este presenta cierto grado de deformación, producto de la solidificación en el proceso de colada continua.

## **Recomendaciones**

Realizar estudios sobre el comportamiento mecánico de la aleación de aluminio AA8011, y con ello crear una base de datos referentes al mismo, ya que en la actualidad existen pocos estudios sobre este material.

Realizar nuevos trabajos de investigación con este mismo enfoque, variando los parámetros del tratamiento térmico, tales como: temperaturas de homogenizado, tiempo de permanencia del horno.

Efectuar trabajos de investigación con las mismas directrices que éste, pero verificando el comportamiento mecánico a distintos porcentajes de deformación y variando la realización del mismo, ya sea antes o después del tratamiento térmico.

Dotar al laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación con materiales especiales para la preparación metalográfica del aluminio y sus aleaciones.

## Referencias

---

---

- *ASM Metals Handbook. (1992). 9th Edicion. Metallography and Microstructures. Volumen 9. pp (707-805) y (1356-1374). EE.UU.*
- *ASM Metals Handbook. (1992). 9th Edicion. Fractography. Volumen 12. pp (721-765). EE.UU.*
- *ASTM E8-00. (2004). "Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials". EE.UU.*
- *Norma ASTM E140-05. (2005). "Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness Microetching Metals and Alloys". EE.UU.*
- *Avner S (1977). "Introducción a la Metalurgia Física". Editorial Mc Graw Hill, 1ª edición, Mexico.*
- *Cordero O y Von Steinberg M (2005). "Influencia de la Temperatura y Tiempo de recocido sobre las Propiedades mecanicas del aluminio AA8011, obtenidas en los ensayos de compresion plana, traccion y dureza", Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad de Carabobo.*
- *De Frenza J, Leañez M, Saenz L y Caralli A (2006). "Influencia del tratamiento de envejecimiento sobre el comportamiento mecanico de la aleacion de aluminio 6063". Rev. INGENIERIA UC. Vol 13, N°3 pp. (19-25).*
- *González V, Lopez R y Ney L (2006). "Efecto de tratamiento isotérmico sobre los cambios de fases de una aleación AA8011". Revista Mexicana de Física, Vol., 52(3), pp. (147-149).*
- *Ipohorski M (2004). "Fractografia electronic: Su contribucion al analisis de fallas". Revista SAM, Vol 1.*
- *King F. (1992). El aluminio y sus aleaciones. Editorial limusa, 1era edición. México D.F.*
- *Lazo Y y Moreno R (2001). "Efecto del tiempo y de la temperatura de recocido en las propiedades mecánicas obtenidas de ensayos de*

*traccion, dureza y embutucion del aluminio AA8011 laminado en frio*, Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad de Carabobo.

- *Leal R y Franco I (2000). "Influencia del recocido sobre las Propiedades mecanicas obtenidas de ensayos de tracción, dureza y embutición, del aluminio AA8011 laminado en frio", Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad de Carabobo.*
- *Moldovan P, Popescu G y Miculescu F (2004). "Microscopic study regarding the microstructure evolution of the 8006 alloy in the plastic deformation process". Journal of Materials Processing Technology, pp. (153–154) y (408–415).*
- *Ney L (1998). "Characterization by Thermoelectric Power of a Commercial Aluminum-Iron-Silicon Alloy (8011) during Isothermal Precipitation". Metallurgical and Materials Transactions A, Vol., 29A, pp. (2669- 2677).*
- *Palma S y Tovar C (2003). "Recristalizacion de la aleación de aluminio 8011, en términos de la rata de nucleacion y crecimiento en espesores de 3-4mm", Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad de Carabobo.*
- *Puchi E, Villalobos C, Pineiro A (1994). "Modelling microstructural evolution of comercial twin-roll cast aluminum.iron.silicon alloys during annealing prosses at industrial scale". Riso international Symposium on Materials Science, pp. (469-474).*
- *Puchi E, Carrillo A, Di Simone F (1995). "recocido no isotérmico de la aleación comercial de aluminio 0,83 Fe-0,38 Si (8011 s), proveniente de colada continua de doble rodillo y deformada en frío", pp. (1-12).*
- *Smith W (2004). "Ciencia e Ingeniería Materiales", Editorial Mc Graw Hill, 3ª edición, España.*
- *Totik Y, Sadeler R, Kaymaz I y Gavgali M (2003). "The effect of homogenization treatment on cold deformations of AA 2014 and AA 6063 alloys". Journal of Materials Processing Technology, Vol., 147, pp. (60-64).*
- <http://www.alucasa.com.ve/>. Disponible on line: 10/10/2009

