

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**EVALUAR LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE  
RECOCIDO EN LA EMBUTIBILIDAD DE CHAPAS SEMI  
RÍGIDAS DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres:

**Loaiza T., Guillermo E.**

**Pedreira M., José D.**

Para optar al Título de  
Ingeniero Mecánico.

Caracas, 2009.

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**EVALUAR LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE  
RECOCIDO EN LA EMBUTIBILIDAD DE CHAPAS SEMI  
RÍGIDAS DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Crisanto J. Villalobos G.

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres:

**Loaiza T., Guillermo E.**

**Pedreira M., José D.**

Para optar al Título de  
Ingeniero Mecánico.

Caracas, 2009.



Caracas, 16 de noviembre de 2.009

## ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

**GUILLERMO LOAIZA y JOSÉ PEDREIRA**

*Titulado:*


**“EVALUAR LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE RECOCIDO EN LA EMBUTIBILIDAD DE CHAPAS SEMI RIGIDAS DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

  
\_\_\_\_\_  
**Profa. María de los A. Rodríguez**  
Jurado



  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Crisanto Villalobos**  
Tutor

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Alberto Pertuz**  
Jurado



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA**

Caracas, 16 de noviembre de 2.009

**Prof. GERARDO RAMÍREZ**  
Jefe de la División de Control de Estudios  
Facultad de Ingeniería

Presente.-

Quienes suscriben, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, nos dirigimos a usted con la finalidad de informarle que hemos decidido otorgarle a los Bachilleres:

**GUILLERMO LOAIZA (C.I.V.- 17.145.250)**

y

**JOSÉ PEDREIRA (C.I.V.- 18.205.322)**

**“MENCIÓN HONORÍFICA”**


Por la excelencia demostrada en la realización del Trabajo Especial de Grado titulado:

**“EVALUAR LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE  
RECOCIDO EN LA EMBUTIBILIDAD DE CHAPAS SEMI  
RIGIDAS DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO”**

Sin otro particular a que hacer referencia, quedamos de usted,

  
**Prof. María de los A. Rodríguez**  
Jurado

  
**Prof. Crisanto Villalobos**  
Tutor

  
**Prof. Alberto Pertuz**  
Jurado

“Hacia el 50º Aniversario del 21 de noviembre de 1957, Día del Estudiante”

## **DEDICATORIA**

A Dios, por iluminarme, cuidarme y brindarme la oportunidad de alcanzar el sueño de ser un profesional que hoy en día se hace realidad.

A mis padres, Jairo Loaiza y Gladys Torres, por quererme y apoyarme siempre durante toda mi vida de manera incondicional. Los amo papá y mamá.

A mi hermano, Alberto Loaiza, por siempre velar por mi bienestar y ser un apoyo importante durante toda mi vida.

A Vanessa Carrasco, por apoyarme siempre en todo momento y brindarme su confianza incondicional que me permitió alcanzar este logro tan preciado. Gracias gordita por amarme y estar siempre a mi lado. Te amo.

A Crisanto Villalobos, por guiarme, cuidarme y apoyarme durante esta jornada de vivencia estudiantil. Gracias por los consejos y sabiduría brindada.

A mis amigos, por vivir esta experiencia junto a mí y siempre apoyarme en todo momento. Sin ustedes no estaría aquí.

***Loaiza T., Guillermo E.***

## **DEDICATORIA**

A Dios y a La Virgen, por iluminarme el camino siempre.

A mi padre José Pedreira, por ser siempre un modelo a seguir, apoyarme en todo momento de mi vida y darme su amor y apoyo.

A mi madre Enitt de Pedreira, por darme el amor y la confianza incondicional para que este sueño se hiciera realidad.

Gracias Papá y Mama, los amo. Este logro es de ustedes.

A mis hermanos. José Antonio Pedreira, José Eduardo Pedreira y Victoria Pedreira, por estar en todo momento, formando parte importante en mi crecimiento como persona.

A mi novia, Yumisay Rukoz, por darme fuerza en los momentos de debilidad y estar a mi lado todo este tiempo. Yumi gracias por amarme y compartir conmigo este triunfo, te amo.

Al profesor Crisanto Villalobos, que más allá de ser nuestro tutor, fue un compañero más en este trabajo especial de grado.

A mis amigos, por estar allí en todo momento, tanto al momento de estudio como al momento de fiestas, los quiero.

***Pedreira M., José D.***

## **RECONOCIMIENTOS**

Primero que todo gracias a Dios, porque sin El nada de esto hubiera sido posible.

A nuestros padres, por habernos apoyado en todo el recorrido de nuestra carrera universitaria.

A nuestro tutor académico, Ing. Crisanto Villalobos, por sus asesorías constantes y por hacer posible este logro.

A la Universidad Central de Venezuela, por abrirnos las puertas del saber, apoyar nuestro crecimiento profesional y formarnos como ingeniero.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica y a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, por prestarnos sus laboratorios que ayudaron al desarrollo de nuestro trabajo especial de grado.

A todas aquellas personas que en un momento u otro colaboraron con nosotros para poder llevar a cabo este proyecto.

**Loaiza T., Guillermo E. y Pedreira M., José D.**

**“EVALUAR LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE RECOCIDO EN LA EMBUTIBILIDAD DE CHAPAS SEMI RÍGIDAS DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO”**

**Tutor Académico: Ing. Crisanto Villalobos. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 2009. 68 páginas.**

**Palabras Claves:** Aleación de Aluminio 8011, Temperatura de Recocido, Restauración de Propiedades Mecánicas, Anisotropía, Conformabilidad.

**Resumen**

En el presente estudio se evaluó la influencia de la temperatura de recocido en la embutibilidad de chapas semirígidas de una aleación de aluminio 8011, proveniente de colada continua de doble rodillo. A tal efecto se procedió a determinar los valores de anisotropía normal y planar de la aleación en función de ensayos mecánicos de tracción uniaxial. Inicialmente a las chapas semirígidas de 30 micrómetros se le realizaron tratamientos térmicos de recocido a 325, 350 y 375 °C a distintos tiempos y sentidos de laminación (0, 45 y 90°). Posterior a ello, para cada condición se realizaron ensayos de tracción y ensayos de colapsabilidad para el estudio de la conformabilidad de la chapa. Se compararon los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos, en las distintas direcciones evaluadas, tratando de establecer si existe alguna dependencia funcional entre la anisotropía normal y el efecto de la temperatura de recocido en la embutibilidad.



**Loaiza T., Guillermo E. y Pedreira M., José D.**

**“ASSESSING THE INFLUENCE OF ANNEALING TEMPERATURE  
ON SEMI RIGID SHEET’S DEEP DRAWING PROCESS OF  
ALUMINUM ALLOY”**

**Academic Tutor: Ing. Crisanto Villalobos. Caracas, U.C.V. Faculty of Engineering, School of Mechanical Engineering. 2009. 68 pages.**

**Keywords:** Aluminum alloy 8011, Annealing Temperature, Restoration of Mechanical Properties, Anisotropy, Formability

**Abstract**

In the present research the influence of the annealing temperature was evaluated in the deep drawing process of semi-rigid sheets of an aluminum alloy 8011, from two-roller continuous casting. To this end we proceeded to determine the values of normal and planar anisotropy of the alloy as a function of uniaxial tensile mechanical tests. Initially semi-rigid plates of 30 micrometers were performed thermal annealing treatments at 325, 350 and 375 ° C at different times and directions of lamination (0, 45 and 90 degrees). Subsequently, each condition was tested in tension and collapsibility tests to study the formability of the sheet. We compared the results of mechanical tests, evaluated in different directions, trying to establish whether there is any functional dependence between the normal anisotropy and the effect of annealing temperature in deep drawing processes.

## ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I.....	3
MARCO TEORICO.....	3
1.1. Aluminio; generalidades y aleaciones.....	3
1.2. Generalidades de la aleación AA 8011 .....	7
1.3. Proceso Productivo de CVG-ALUCASA .....	9
1.3.1. Área de Fundición.....	10
1.3.2. Área de Colada.....	11
1.3.2.1. Horno de Retención.....	11
1.3.2.2. Sistema de Desgasificación y Filtraje .....	12
1.3.2.3. Máquina de Colada.....	14
1.3.2.4. Cizalla y Embobinador .....	15
1.3.3. Área de Laminación Gruesa .....	16
1.3.3.1. Laminador Primario .....	16
1.3.3.2. Recocido Intermedio .....	17
1.3.3.3. Laminador Intermedio.....	18
1.3.4. Área de Laminación Fina .....	19
1.3.4.1. Dobladora .....	19
1.3.4.2. Laminador 11 y Laminador 8.....	20
1.3.4.3. Separadoras y Cortadoras.....	21

1.3.4.4. Hornos de Recocido final .....	21
1.3.5. Área de Acabado y Empaque .....	22
1.4. Recocido .....	22
1.5. Recuperación .....	24
1.6. Recristalización .....	25
1.7. Efectos de la temperatura de recocido.....	26
1.8. Anisotropía .....	26
1.9. Embutibilidad .....	27
CAPÍTULO II .....	30
MARCO METODOLÓGICO .....	30
2.1. Descripción del material utilizado.....	30
2.2. Preparación de las muestras .....	32
2.2.1. Ensayo de tracción uniaxial.....	32
2.2.2. Ensayos de colapsabilidad.....	34
2.3. Tratamiento térmico de recocido.....	35
2.4. Ensayos mecánicos .....	37
2.4.1. Ensayo de Tracción Uniaxial .....	37
2.4.2. Ensayos de Colapsabilidad.....	42
2.5. Proceso de medición del ancho de las probetas .....	44
2.6. Anisotropía del material. ....	45
CAPÍTULO III .....	47
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	47

3.1. Caracterización del material.....	47
3.2. Ensayo de Tracción Uniaxial .....	51
3.3. Anisotropía.....	56
3.4. Ensayo de colapsabilidad .....	61
CAPÍTULO IV.....	63
CONCLUSIONES .....	63
RECOMENDACIONES.....	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I.....	3
MARCO TEORICO.....	3
<b>Tabla 1.1</b> Pases del laminador primario.....	17
<b>Tabla 1.2</b> Parámetros de uso de los hornos de recocido intermedio.....	18
<b>Tabla 1.3</b> Pases del laminador intermedio.....	19
<b>Tabla 1.4</b> Pases del laminador 11 y del laminador 8.....	20
<b>Tabla 1.5</b> Parámetros de uso de los hornos de recocido final.....	22
CAPÍTULO II.....	30
MARCO METODOLÓGICO.....	30
<b>Tabla 2.1.</b> Composición química del material a estudiar.....	31
CAPÍTULO III.....	47
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	47
<b>Tabla 3.1</b> Composición química del material a estudiar.....	48
<b>Tabla 3.2</b> Composición nominal de Hierro y Silicio en la aleación comercial de aluminio 8011.....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I.....	3
MARCO TEORICO.....	3
<b>Figura 1.1.</b> Áreas de la línea de producción de Fólil Domestico de C.V.G. ALUCASA.....	10
<b>Figura 1.2.</b> Máquinas del área de colada.....	11
<b>Figura 1.3.</b> Dispositivo de desgasificación tipo SNIF. ....	14
<b>Figura 1.4.</b> Máquinas del área de laminación gruesa.....	16
<b>Figura 1.5.</b> Máquinas del área de laminación fina. ....	19
CAPÍTULO II.....	30
MARCO METODOLÓGICO.....	30
<b>Figura 2.1.</b> Esquema del trabajo de investigación. ....	32
<b>Figura 2.2.</b> Dimensiones de las probetas para ensayos de tracción. (Medidas en mm) .....	33
<b>Figura 2.3.</b> Cizalla de doble cuchilla. ....	33
<b>Figura 2.4.</b> Grupo de muestras con sus concernientes ángulos con respecto al sentido de laminación.....	34
<b>Figura 2.5.</b> Dimensiones de las probetas para ensayos de colapsabilidad. (Medidas en mm) .....	34
<b>Figura 2.6.</b> Disposición de las probetas para realizar el tratamiento. ....	35
<b>Figura 2.7.</b> Horno de resistencia eléctrica para tratamientos térmicos. ....	35
<b>Figura 2.8.</b> Máquina universal marca INSTRON. ....	37

<b>Figura 2.9.</b> Maquina de colapsabilidad. ....	43
<b>Figura 2.10.</b> Microscopio Óptico. ....	44
<b>Figura 2.11.</b> Cuadrícula milimetrada y marca micrométrica. ....	45
<b>Figura 2.12.</b> Medición del Ancho de la Probeta. ....	45
CAPÍTULO III .....	47
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	47
<b>Figura 3.1.</b> Zonas de estudio de la chapa. ....	48
<b>Figura 3.2.</b> Sección longitudinal .....	49
<b>Figura 3.3.</b> Sección Transversal .....	50
<b>Figura 3.4.</b> Sección superficial.....	51
<b>Figura 3.5.</b> Curvas de esfuerzo real vs deformación real para especímenes sin tratamientos térmicos.....	51
<b>Figura 3.6.</b> Curvas de esfuerzo real vs deformación real para una temperatura de tratamiento térmico de recocido de 325 °C. ....	52
<b>Figura 3.7.</b> Curvas de esfuerzo real vs deformación real para una temperatura de tratamiento térmico de recocido de 350 °C. ....	52
<b>Figura 3.8.</b> Curvas de esfuerzo real vs deformación real para una temperatura de tratamiento térmico de recocido de 375 °C. ....	53
<b>Figura 3.9.</b> Curvas de esfuerzo real vs deformación real para todas las probetas ensayadas. ....	53
<b>Figura 3.10.</b> Anisotropía Normal del Material de Estudio.....	57
<b>Figura 3.11.</b> Anisotropía Planar del Material de Estudio.....	58

<b>Figura 3.12.</b> Variación de la propiedad mecánica con respecto al tiempo para una temperatura de 325°C. ....	59
<b>Figura 3.13.</b> Variación de la propiedad mecánica con respecto al tiempo para una temperatura de 375°C. ....	59
<b>Figura 3.14.</b> Índice de restauración vs Tiempo de recocido (0 grados) .....	61
<b>Figura 3.15.</b> Ensayo de Colapsabilidad.....	62



## INTRODUCCIÓN

El aluminio es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. Es un material extremadamente versátil por el conjunto de formas que puede tomar (fundición, extrusión, tubos, hojas, entre otros.) y posee una variedad de acabados superficiales disponibles, que da como resultado una amplia gama de productos. Los compuestos de aluminio representan aproximadamente el 8% de la corteza de la tierra y es un metal único ya que es fuerte, duradero, flexible, impermeable, liviano, resistente a la corrosión y 100% reciclable.

Este material ha sido producido comercialmente por 153 años. A pesar de que el cobre ha sido utilizado por miles de años, hoy en día se produce más aluminio que cualquier otro elemento no ferroso combinado.

En la actualidad Venezuela es un país productor de materias primas siendo nuestra industria petrolera el principal medio de producción de bienes de capital de la nación, algo semejante ocurre con en el sector de aluminio pero en un segundo plano, el cual está muy por encima del siderúrgico y del resto de la minería extractiva secundaria. Debido a esto, a nivel nacional es un sector consolidado en el cual tenemos ventajas naturales, donde no solo disponemos de una alta reserva de recursos minerales necesario para su desarrollo sino que se tiene la mayor ventaja de todas que es la capacidad y disponibilidad de energía eléctrica a bajos costos, condición que sin lugar a dudas muy pocos países pueden disfrutar. Hoy en día Venezuela cuenta con yacimientos importantes de Bauxita, dispone tanto de la tecnología extractiva como de los procesos subsiguientes. No obstante tenemos un desarrollo incipiente a lo

relacionado con la generación de nuevas aleaciones de carácter estructural y ningún tipo de experticia en la síntesis de aleaciones especiales de base aluminio con aplicaciones en balística, aeronáutica y aeroespaciales que mundialmente representa un mercado atractivo, así mismo existen plantas en el país las cuales han logrado consolidar una red de desarrollo en torno a generar valor agregado al aluminio primario, dentro de las cuales se encuentran las plantas de laminación de productos planos semirígidos y fóil de aluminio. Es aquí en donde el presente estudio procura generar aportes con el fin de mejorar las prácticas operativas y garantizar productos de alta calidad y de alta expectativa de uso, afianzando la calidad de nuestros productos en mercados nacionales e internacionales.

Dentro de las plantas de mayor tradición en el área de procesamiento de aluminio primario para la generación de fóil y semirígido se encuentra la empresa CVG ALUCASA, con la cual se pretende desarrollar un proyecto de investigación que contemple vías alternas más eficientes en la obtención de productos de bajo espesor con mejoras significativas en sus propiedades macro mecánicas. En la actualidad la obtención de fóil de aluminio se hace a partir de colada continua de doble rodillo de un aleación de la serie 8xxx específicamente la denominada comercialmente 8011 en sus distintas versiones, seguida de pases sucesivos de laminación con recocidos anisotérmicos intermedios, mediante la aplicación de temperaturas muy elevadas, con lo cual se obtiene un producto con propiedades aceptables. En el presente proyecto de investigación se pretende evaluar la influencia de la temperatura de recocido en la embutibilidad de chapas semirígidas de una aleación de aluminio 8011, proveniente de colada continua de doble rodillo, en términos de la determinación de la anisotropía normal y planar del material.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEORICO

### 1.1 Aluminio; generalidades y aleaciones.

El Aluminio es un metal no ferroso de gran importancia, dada su combinación poco usual de ligereza y resistencia por lo que tiene muchos usos en los que otros metales no son adecuados. Presenta un 63% de la conductividad eléctrica del cobre, pesando menos de la mitad y posee una alta ductilidad a temperaturas elevadas.

Las propiedades del aluminio dependen de un conjunto de factores, de estos, el más importante es la existencia de aleantes. Con la excepción del aluminio purísimo (99,99 % de pureza), técnicamente se utilizan sólo aleaciones de aluminio. Aún en el aluminio purísimo, las impurezas (Fe y Si) determinan, en gran medida, sus propiedades mecánicas. Los elementos aleantes principales del aluminio son: cobre (Cu), silicio (Si), magnesio (Mg), zinc (Zn) y manganeso (Mn), en menores cantidades existen, frecuentemente, como impurezas o aditivos: hierro (Fe), cromo (Cr) y titanio (Ti). Para aleaciones especiales se adiciona: níquel (Ni), cobalto (Co), plata (Ag), litio (Li), vanadio (V), circonio (Zr), estaño (Sn), plomo (Pb), cadmio (Cd) y bismuto (Bi). La clasificación del aluminio y sus aleaciones se divide en dos grandes grupos bien diferenciados, estos dos grupos son: forja y fundición. Esta división se debe a los diferentes procesos de conformado que puede sufrir el aluminio y sus aleaciones.

Para las aleaciones de aluminio se usa un sistema de numeración que consiste en cuatro dígitos; el primero de los cuales indica el principal elemento aleante, como por ejemplo la aleación 2XXX indica que su elemento aleante es el cobre y en el 3XXX es el manganeso, mientras en el 8XXX indica la presencia de hierro, silicio u otros elementos. El segundo dígito se refiere a modificaciones en la composición de los límites de impurezas o en los elementos aleantes originales. Por su parte, los dos últimos dígitos en la serie 1xxx (correspondiente a aleaciones de alta pureza) reflejan el porcentaje mínimo de aluminio por encima de 99.00%, mientras que en las demás series estos últimos dígitos no tienen un significado especial, y sólo sirven para identificar las diferentes aleaciones de aluminio en el seno del grupo, haciéndose notar que no se establece por un orden cronológico determinado [18].

Algunas propiedades del aluminio y sus aleaciones, como por ejemplo su ventajosa relación de resistencia peso, su resistencia a la corrosión y su alta conductividad eléctrica y térmica; lo han convertido en un material importantísimo para la construcción de aviones, automóviles, máquinas de transporte, para la electrotecnia, la fabricación de motores de combustión interna, para conductores eléctricos y para partes estructurales fundidas y forjadas. Cuando se utiliza de manera correcta el aluminio resiste muy bien la corrosión. El Aluminio conserva su resistencia y su ductilidad a temperaturas por debajo de cero, que es lo opuesto de lo que sucede con el hierro y el acero, debido a que posee una estructura cristalina FCC y por lo tanto no tiene temperatura de transición dúctil - frágil.

Las propiedades mecánicas o propiedades de resistencia mecánica se utilizan como base para dictaminar sobre un material metálico, con vistas a un fin de aplicación concreto. El aluminio puro tiene una resistencia a la tensión de aproximadamente 90 MPa, pero existen aleaciones de aluminio cuya resistencia a la tracción alcanza hasta más de 530 MPa. El módulo de Young para aluminio puro es de 69 GPa, al agregarles componentes aleantes no existe un cambio apreciable de esta propiedad, siendo aproximadamente una tercera parte del valor de la misma propiedad para el acero [13].

La resistencia a la tracción aumenta con el aumento en elementos de aleación. Los dominios de la resistencia en cada aleación surgen, ante todo, como consecuencia de los aumentos de resistencia que se consiguen por deformación en frío o endurecimiento por tratamiento térmico. Los distintos elementos de aleación actúan de modo muy diferente en cuanto al aumento de resistencia.

Es muy importante destacar que a todas las aleaciones de aluminio se les puede aplicar la mayoría de los tratamientos térmicos, pero en el caso de las aleaciones con alto contenido de hierro y silicio, como en el caso de la AA 8011, no son endurecibles por precipitación, aunque es posible restituir las propiedades mecánicas por medio de tratamientos de recocido. Con los recocidos totales se pretende conseguir una eliminación de las tensiones propias del producto fundido, un equilibrio de los granos segregados y una disolución de los constituyentes estructurales eutécticos en los bordes de los mismos. Además el recocido total sirve con frecuencia para conseguir una disgregación regular de elementos disueltos en estado de sobresaturación, especialmente Mn y Fe, que influyen sobre el comportamiento en la recristalización y en la

conformabilidad en caliente. Finalmente en las aleaciones endurecibles se consigue disolver los elementos de aleación que provocan el endurecimiento. Estos se depositan de nuevo, en el siguiente enfriamiento, que no suele ser rápido. Además si se realiza correctamente el proceso, la distribución tiene lugar de tal forma que, mediante un temple posterior, la disolución tiene lugar de forma rápida y total. El recocido total puede colaborar, por lo tanto, a la disminución de las fuerzas necesarias para la conformación en caliente, a una tendencia hacia el ablandamiento uniforme y recocido de ablandamiento y a un mejoramiento de la conformabilidad en frío.

Por otra parte el aluminio es muy resistente a la corrosión por ser un material pasivante, es decir que genera de forma natural una capa de óxido ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  dándole su típico color gris), diferentes tipos de tratamiento de revestimiento pueden mejorar aún más esta propiedad. Resulta especialmente útil para aquellos productos que requieren de protección y conservación. Además posee alta resistencia a la corrosión producida en ambientes salinos, haciéndolo útil para fabricar cascos de barco y en general en la industria marítima y naval.

Su elevada conductividad térmica es una importante ventaja, dado que permite que el calor generado en procesos de mecanizado se disipe con rapidez, además se puede emplear en pistones de motores de combustión interna y demás. Presenta un 63% de la conductividad eléctrica del cobre para alambres de un tamaño dado, pero pesa menos de la mitad. Un alambre de aluminio de conductividad comparable a un alambre de cobre es más grueso, pero sigue siendo más ligero que el de cobre. Cabe destacar que el peso tiene mucha importancia en la transmisión de electricidad de alto voltaje a larga

distancia, y actualmente se usan conductores de aluminio para transmitir electricidad a muy altos voltajes.

La excelente capacidad de conformabilidad de este material hace posible su manufactura mediante extrusión, de perfiles y tubos con secciones transversales completamente arbitrarias. También con casi todos los demás procesos habituales de conformado en frío y en caliente, se pueden fabricar toda clase de productos semi elaborados y piezas terminadas.

## **1.2 Generalidades de la aleación AA 8011**

La aleación estudiada en la presente investigación corresponde a la serie 8xxx, según la denominación 8011-M, propuesta por la empresa productora. Es conveniente destacar que la serie 8xxx (serie asignada para las nuevas aleaciones de aluminio) no presentar elementos aleantes comunes para cada una de sus denominaciones, por lo que la serie como tal no posee unas características generales determinadas. Sin embargo, por su contenido de Fe y Si como principales elementos aleantes, se puede comparar con aleaciones de la serie 1xxx como por ejemplo la aleación 1100, lo cual presenta contenidos similares de Fe y Si [5].

Como es conocido el Si y el Fe se encuentran en las aleaciones de aluminio, muchas veces en cantidades significativas, las cuales afectan el comportamiento de las mismas, por lo cual es importante considerar su efecto en los sistemas de aluminio. Siendo, la presencia de partículas de segunda fase formadas por dichos elementos, capaz de estabilizar una estructura de granos

finos o subgranos, pudiéndose desarrollar combinaciones interesantes de resistencia y ductilidad. [1]

En cuanto al Si, se encuentra que es soluble en el aluminio hasta 1,65% a la temperatura eutéctica de 577° C, al disminuir la temperatura la solubilidad disminuye hasta un 0,08% a 250° C. Aunque son teóricamente susceptibles al temple estructural, estas aleaciones no se someten al tratamiento, pues prácticamente no se consiguen mejoras significativas. La adición de Si mejora la resistencia mecánica de la aleación sin reducir de modo notable la ductilidad, por otra parte no reduce la resistencia a la corrosión por lo que se consideran medianamente resistentes [5,6].

Por otra parte es conocido que el Fe aumenta ligeramente la resistencia a la tracción, fluencia y alargamiento. Así mismo, se observan diferencias morfológicas importantes en superficies de fractura. La baja solubilidad del Fe en el aluminio (máximo 0,52% en el eutéctico a 655 °C 0,025% a 600 °C y 0,006% a 500 °C) provoca la formación de partículas intermetálicas incoherentes (Al-Fe-Si) que dependiendo de su tamaño actuarán como concentradores en la deformación plástica. Además el Fe reduce la cantidad de Si libre, disminuyendo la tendencia a la fragilidad [3, 6].

La aleación en estudio al igual que las aleaciones de las series 1xxx, 3xxx, 4xxx y 5xxx, presentan poca susceptibilidad al temple y a los tratamientos térmicos en general. Este tipo de aleaciones no son endurecibles por precipitación (envejecimiento) y sólo presentan fenómenos de recuperación, recristalización, crecimiento de grano y homogenización, en consecuencia sólo



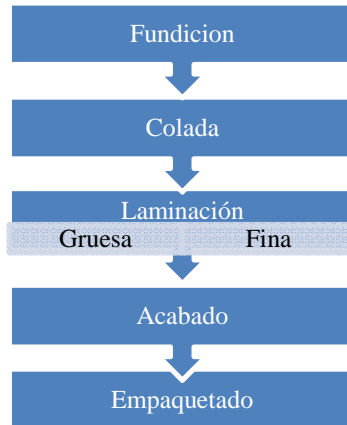
son endurecibles por deformación por lo que se les denomina “no tratables térmicamente” [11].

La serie 8xxx ha sido utilizada en Europa; en Venezuela es desarrollada la aleación 8011, por la empresa C.V.G. ALUCASA, la cual elabora desde papel doméstico (fóil) hasta techos, pasando por mantos asfálticos e impermeabilizantes y ductos. Además esta empresa produce fóil semirígido, el cual es usado para la elaboración de envases de aluminio, por su resistencia a altas temperaturas y su adecuada maleabilidad que facilita los procesos de embutido, utilizándose principalmente en la obtención de artículos para el hogar. Estos productos son usado en industrias del sector alimenticio (alimentos deshidratados), ya que actúa como elemento barrera de oxígeno y vapor de agua para los alimentos, así como en las industrias de empaques flexibles, ya sea farmacéutica o de artes gráficas. También tiene aplicaciones en las industrias automotrices y de refrigeración doméstica e industrial, gracias a sus altos niveles de conductividad térmica y su adecuada maleabilidad.

### **1.3 Proceso Productivo de CVG-ALUCASA**

La línea de producción de esta empresa se basa [17] en la obtención de chapas de aluminio por medio de colada continua, el cual es un proceso muy desarrollado alrededor del mundo, por su gran versatilidad. Luego de la obtención de la chapa, se realizan varios pases de laminación hasta lograr el espesor y la calidad exigida por el mercado, lo cual se logra controlando ciertas condiciones, como la composición del material, la temperatura de colada, el tamaño de los granos, las velocidades de laminación, los porcentajes de reducción y las temperaturas de recocido entre otros muchos aspectos

influyentes. A continuación se describe de manera más detallada las áreas de producción de fólil de aluminio, el cual es el producto con mayor valor agregado de la empresa. En la figura 1.1 se esquematizan dichas áreas.



**Figura 1.1.** Áreas de la línea de producción de Fólil Domestico de C.V.G. ALUCASA.

### **1.3.1 Área de Fundición.**

En el proceso de fundición se introduce la materia prima conformada por pilas o lingotes de aluminio primario con una pureza igual o superior al 99,5%, proveniente de CVG-ALCASA y CVG-VENALUM; chatarra de aluminio y para el caso de nuestra aleación Hierro y Silicio.

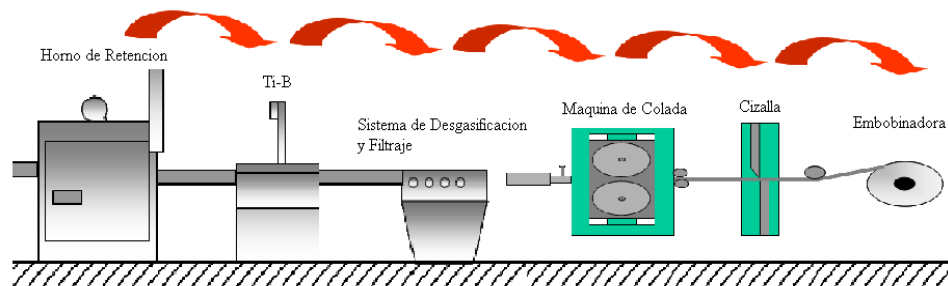
Estas pilas de aluminio primario, son precalentadas a fuego directo por aproximadamente 8 horas (Presentar Figura), antes de ser introducidas en el horno fusor, con la finalidad de eliminar la humedad que puedan tener y aumentar del mismo modo su eficiencia.

La función de esta área, es la fusión de la materia prima y su tratamiento a través de hornos. Este es un proceso físico, el cual consiste en el cambio que

ocurre cuando la materia pasa de estado sólido a líquido, por medio del calentamiento y del mismo modo la formación de la aleación ya que es que aquí donde se unen por medio de la fusión el Aluminio con el Hierro y el Silicio. El proceso de fusión se realiza a una temperatura máxima de 850 °C y presión atmosférica.

### 1.3.2 Área de Colada.

En esta área existe un conjunto de operaciones unitarias interconectadas que garantizan el producto final, que no es más que la transformación de líquido a sólido obteniendo una chapa de aluminio; dichas operaciones se muestran en la figura 1.2.



**Figura 1.2.** Máquinas del área de colada.

#### 1.3.2.1 Horno de Retención

En este horno se perfecciona el tratamiento del metal y se alcanza la temperatura de colada, cuyo valor es de aproximadamente 820 °C, esto ocurre con la ayuda de una serie de quemadores y con un sistema de regulación de temperatura.

Entre el horno de fusión y el de retención se instala un canal con una capa en acero y cubierta refractaria, a través del cual el metal es periódicamente transferido por gravedad.

Al salir el material del horno se le inyecta Titanio-Boro, esto se debe a que es necesario obtener un tamaño de grano lo más pequeño posible, ya que si se cumple esta condición, mejora significativamente las propiedades mecánicas de las fundiciones metálicas, esto puede lograrse por medio de un buen refinamiento de grano añadiendo inoculantes al metal líquido. Estos inoculantes se agregan en una forma conveniente para ser distribuidos uniformemente a través del líquido y actúan como agentes nucleantes para incrementar la velocidad de nucleación a través del colado. En aleaciones de aluminio se añade Titanio y Boro en la forma de sales de fluoruro de potasio, las cuales se descomponen para formar Ti y B elementales, los cuales reaccionan uno con otro y con el aluminio.

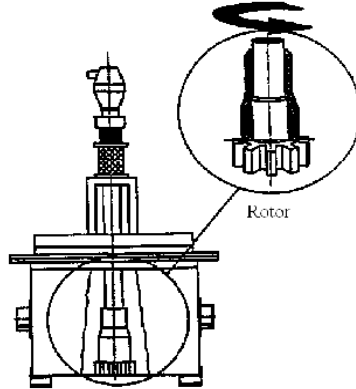
#### **1.3.2.2 Sistema de Desgasificación y Filtraje**

Este proceso se basa en la acción mecánica y química de una inyección en el flujo del metal de un gas inerte generalmente mezclado con Cloro, causando además la remoción de sólidos suspendidos, el gas utilizado es generalmente Argón y es suministrado a través de rotores, para eliminar el posible hidrógeno presente en el baño. Dicho elemento en forma de molécula, al ocupar un espacio determinado en el baño de colada, desplaza localmente al material durante la solidificación, siendo capaz de crear defectos en el material, ya que a medida que se solidifica el material el hidrogeno se desprenderá por

difusión, dejando un espacio libre en el interior de la chapa, pudiendo llegar a ser de micrómetros de diámetro, lo cual en una lamina de fóil de aluminio podría representar un agujero que atraviesa el material.

El Argón en forma de burbuja dentro del material fundido crea zonas de baja concentración de Hidrógeno, como todo sistema que tiende al equilibrio, el hidrógeno trata de ocupar estas zonas, pero quedan atrapados dentro de las burbujas, estas ascienden, llevando al hidrogeno fuera del baño de colada. Además estas burbujas crean una corriente convectiva, a medida que ascienden y gracias al efecto mecánico del rotor, la cual arrastra pequeños sólidos presentes en el baño, dejando al material con una baja densidad de hidrógeno y con un poco presencia de partículas pequeñas, los sólidos que no pudieron ser arrastrados, son eliminados más adelante por el filtro.

El gas inerte se mezcla normalmente con Cloro, ya que este atrae los elementos alcalinos presente en el material fundido, como el sodio, el potasio y el litio, estos al igual que el hidrógeno crean defectos en el material una vez que se solidifique, debido a que, al tener propiedades mecánicas distintas, no se deforman junto con el resto del metal, pudiéndose crear estructuras de micrómetros de diámetro que afectarían el producto final. El dispositivo encargado de este proceso se denomina SNIF T25, y está constituido de una caja metálica, recubierta de un material refractario en su interior. Este dispositivo se presenta en la figura 1.3.



**Figura 1.3.** Dispositivo de desgasificación tipo SNIF.

Finalmente el filtro atrapa aquellos sólidos que no pudieron extraerse por medio del sistema de desgasificación, este puede estar dotado de mecanismos para la abertura de la tapa o para voltear el cuerpo. Se utilizan un sistema de filtros dobles de 50 y 30 poros por pulgadas, estos están constituidos de una membrana cerámica porosa contenida en una caja metálica, revestida en su interior de refractario, que tiene como finalidad la captura de las partículas sólidas suspendidas.

### **1.3.2.3 Máquina de Colada**

En esta etapa se realiza un procedimiento denominado proceso “Caster” o vaciado continuo de lámina en rollo, la cual se basa en la colocación de una pieza cerámica conocida como boquilla, y cuenta con una serie de bloques por donde se cuela el metal líquido antes de entrar a los rodillos de colada envueltos en unas camisas, los cuales están enfriados internamente con agua. Produciéndose una banda de aluminio cuyo espesor generalmente se encuentra entre 6 y 10 mm.

Esta área cuenta con 4 líneas de colada continua. Estas máquinas se diferencian entre sí, esencialmente por la disposición de los rodillos y del terminal de colada, que hacen que la banda salga con un ángulo respectivamente de 15° y de 0° respecto a un plano horizontal.

#### **1.3.2.4 Cizalla y Embobinador**

Una vez formada la lámina de acuerdo a la secuencia del equipo, pasa por unos rodillos pinzadores que permiten guiarla además de efectuar una tensión leve en la misma, sobre todo en los inicios del rollo o bobina, de ahí pasa por la cizalla de accionamiento hidráulico, donde se efectúa los cortes necesarios tanto de puntas y colas o terminación de bobina, además de muestras para inspección y pruebas.

Por último; en el enrollador o embobinador, accionado a través de un sistema motor-reductor, con regulación de velocidad y de tensión, se enrolla la lámina tomándose en cuenta el peso y el diámetro tanto interno como externo para definir la terminación de una bobina, y efectuar el corte que dará inicio a la siguiente etapa, esta bobina cuyo espesor resultante es de aproximadamente 6 mm, se deja enfriar a temperatura ambiente durante 48 horas. Es importante señalar, que el proceso completo desde el horno de fusión hasta el enrollador, se conoce comúnmente como proceso de Colada Continua de Doble Rodillo (CCDR).

### 1.3.3 Área de Laminación Gruesa

El proceso de laminación es aquel en el cual, una lámina de aluminio se hace pasar a través de dos cilindros, que giran aplicando carga hasta llegar al espesor deseado. Este se obtiene aplicando una serie de pases en los laminadores, cada pase es de aproximadamente el 50% de reducción en el espesor. En CVG-Alucasa todos los laminadores son del tipo “Laminador Cuarto”. En la figura 1.4 se presentan las máquinas de esta área.

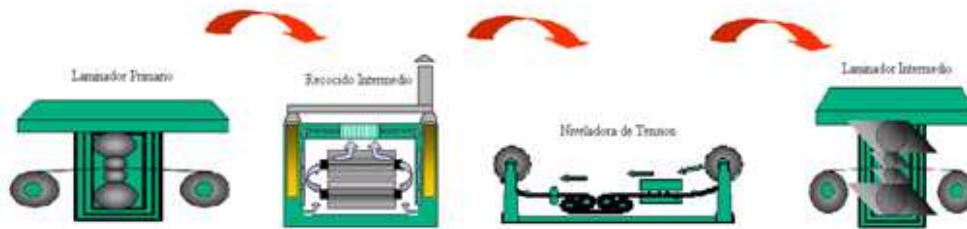


Figura 1.4. Máquinas del área de laminación gruesa.

#### 1.3.3.1 Laminador Primario

En esta etapa se reduce el material de 6 a 0,27 mm, a través de 4 pases principales de reducción sin recocido intermedio, en la tabla 1.1 se presentan los distintos pases con sus respectivos datos.



**Tabla 1.1** Pases del laminador primario.

Pase No.	Espesor Entrada (mm)	Espesor Salida (mm)	Velocidad (m/min)
1	6.00	2.88	100
2	2.88	1.32	160
3	1.32	0.58	320
4	0.58	0.27	400

### 1.3.3.2 Recocido Intermedio

Los hornos más comúnmente usados para tratar térmicamente el aluminio y sus aleaciones son los hornos de sales y de atmosfera. La empresa CVG-ALUCASA usa hornos de atmosfera, específicamente de resistencia eléctrica o por combustible, debido a que son especialmente ventajosos para tratamiento térmicos a temperatura entre 100 y 200° C, y para temperaturas superiores a los 500 °C. Además, son adecuados para el tratamiento de piezas de forma complicada, y piezas de fundición.

En los hornos de aire, las piezas han de estar situadas con suficiente espaciamiento unas de otras, y sobre todo separadas de las paredes del horno. Es indispensable calentar rápidamente la carga que se trate de recocer, porque una velocidad de calentamiento baja, favorece un tamaño de grano grande y a la ocurrencia de la precipitación de fase secundaria. Es muy importante que para conseguir una buena uniformidad de la temperatura y un rápido calentamiento en estos hornos, dispongan de una buena circulación de aire. A continuación se presentan los parámetros respectivos de los hornos, en la tabla 1.2.

**Tabla 1.2** Parámetros de uso de los hornos de recocido intermedio.

Espesor (mm)	Temperatura (° C)	Tiempo (Hrs)
1.32	500	9 (cámara)
0.250 0.350	250	3 abs. (bobina)
0.050 0.055 0.060	290	8 abs. (bobina)

Durante el proceso se realiza la reducción del ancho de la lámina desde 1320 a 1284 mm a una velocidad de 150 m/min, manteniéndose su espesor inicial (aproximadamente 0,58 mm)

### **1.3.3.3 Laminador Intermedio**

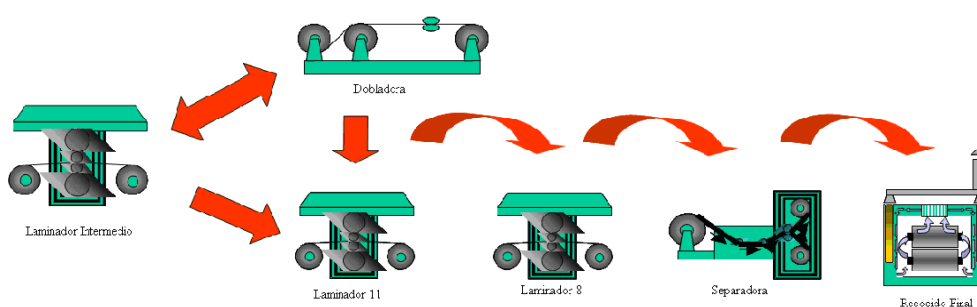
Una vez asegurado una condición de tensión de la lámina considerablemente homogénea, se procede a seguir laminando, los parámetros de los respectivos pases del laminador intermedio se muestran en la tabla 1.3:

**Tabla 1.3** Pases del laminador intermedio

Pase No.	Espesor Entrada (mm)	Espesor Salida (mm)	Velocidad (m/min)
5	0.270	0.120	650
6	0.120	0.055	700

### 1.3.4 Área de Laminación Fina

Esta área es la etapa final del proceso de laminación para poder alcanzar el espesor deseado del fólil doméstico, la cual está conformada por las máquinas mostradas en la figura 1.5.



**Figura 1.5.** Máquinas del área de laminación fina.

#### 1.3.4.1 Dobladora

Después de que la lámina haya sido deformada por el laminador intermedio, se toma en cuenta que al trabajar con espesores muy bajos el material se hace propenso a fallar al ser laminado, debido a las grandes cargas aplicadas, tanto normales como de cizallamiento, por lo cual se hace necesario unir dos láminas del metal durante los procesos de laminado subsiguientes, para

procesar así un conjunto de mayor espesor. Estas láminas son unidas por medio de la dobladora, la cual toma las láminas de dos bobinas distintas, las compacta y las vuelve a embobinar en un tercer mandril, obteniéndose así una lámina doble que, después de ser procesada, será separada como dos láminas de un espesor menor.

#### 1.3.4.2 Laminador 11 y Laminador 8

Estos dos laminadores son los últimos en el proceso productivo, encargándose de reducir la lámina a los valores de espesor más bajos, la información técnica de los pases realizados en estas máquinas se encuentra a continuación, en la tabla 1.4:

**Tabla 1.4** Pases del laminador 11 y del laminador 8.

Pase No.	Espesor Entrada (mm)	Espesor Salida (mm)	Velocidad (m/min)
7	0.055	0.024	650-700
8	0.024	0.011 0.0115 0.012 0.0125	650-700
-	0.016	0.008 0.009	650-700

### **1.3.4.3 Separadoras y Cortadoras**

Estas máquinas preparan el producto final para el proceso de la línea de producción que es el recocido final, como el nombre lo indica separan, de ser necesario, las láminas unidas en la dobladora, cuyo espesor es el deseado y lo cortan.

Es importante comentar que cuando se enrolla la lámina en la bobina, que posteriormente será sometida al proceso antes mencionado, ocurre un fenómeno de estiramiento que da como resultado una reducción final del espesor de la lámina. Esto se requiere ya que el valor del espesor deseado es tan pequeño, que incluso los últimos laminadores no son capaces de llegar al valor pedido por los clientes, pero es conseguido gracias al estiramiento de la lámina.

### **1.3.4.4 Hornos de Recocido final**

Esta etapa es la última del proceso de laminación, donde se recoce por última vez el material, para devolver las propiedades mecánicas que fueron modificadas por los últimos pases de laminación, con el fin de obtener fóil doméstico con una buena ductilidad. En la tabla 1.5 se encuentran las especificaciones técnicas de los hornos de recocido final.

**Tabla 1.5** Parámetros de uso de los hornos de recocido final.

Espesor (mm)	Temperatura (°C)	Tiempo (Hrs)
0.011 0.0115 0.012 0.0125	245	9
0.028	300	28
0.008 0.009	300	35

### **1.3.5 Área de Acabado y Empaque**

En el acabado se le dan las características finales al fólil de aluminio según requisitos del cliente (diámetro, ancho, acabado superficial), o se le añade algún atributo o valor agregado, requerido por los clientes. Además se realiza el rebobinado y empaque del fólil para uso doméstico e institucional.

### **1.4 Recocido**

En general, según el Metals Handbook editado por American Society for Metals, los tratamientos térmicos son una combinación de operaciones de calentamientos y enfriamientos de tiempos determinados, aplicada a un metal o aleación de forma tal que produzca las condiciones deseadas. El recocido, en particular, tiene como finalidad principal ablandar el metal, regenerar la estructura o simplemente eliminar las tensiones internas presentes después de un proceso de deformación.

En el caso concreto, al recocer completamente al aluminio se le confiere la plasticidad máxima, liberando tensiones y disminuyendo su límite elástico lo máximo posible, mediante un calentamiento de una determinada duración y a una temperatura definida, de manera que se obtenga la mejor capacidad de deformación, este estado corresponde a una recristalización completa y el tratamiento se aplica, ya sea en el curso de la fabricación (recocido intermedio), o al final de la fabricación (recocido final), generalmente, el recocido completo se efectúa sobre el metal con acritud, con la finalidad de devolver completamente sus posibilidades de deformación [12].

Gracias al tratamiento térmico de recocido se presentan cambios que se producen en las distintas propiedades físicas y mecánicas, principalmente en la dureza, en la densidad, en el tamaño de celda y en la resistividad.

La dureza disminuye con el recocido, recuperando en cierta medida su ductilidad. Regularmente sólo hay un pequeño cambio en la dureza del material durante el proceso de recuperación; este corresponde, aproximadamente, a sólo un quinto del total. Esto se debe a que la dureza disminuye al disminuir la densidad de las dislocaciones. Durante el proceso de recristalización ocurre un fenómeno similar; pero mientras que en la recuperación se da una pequeña caída de la densidad de dislocaciones, durante la recristalización hay una gran caída de estas; Esto ha de esperarse, ya que los nuevos granos recristalizados deben estar esencialmente libres de tensiones, lo que produce la disminución de la dureza en un mayor grado.

Con respecto a la densidad de un material laminado en frío, esta disminuye debido a la generación de vacancias. Las dislocaciones de aristas también hacen una pequeña contribución a la disminución de la densidad, gracias a la dilatación del metal original en el proceso de recocido durante la recuperación, lo que involucra una disminución en la concentración de vacancias y probablemente una disminución de la densidad de las dislocaciones. De lo anterior se puede deducir que la densidad aumenta en el proceso de recocido. El tamaño de celda aumenta ligeramente en la primera parte de la etapa de recuperación, pero estas celdas desaparecen totalmente en la recristalización.

La resistividad eléctrica es modificada debido a los defectos presentes en el metal, que actúan como sitios de riego para los electrones en movimiento, y por consiguiente aumentando la resistividad del material. Por tanto en la recuperación se produce una caída significativa de esta propiedad, siendo la misma una medida de la resistencia ofrecida por él, al flujo de electrones producidos por un campo eléctrico.

## **1.5 Recuperación**

Es el fenómeno energético previo a la recristalización, debido a que el valor que tiene que alcanzar la temperatura para que se de este fenómeno, es mucho menor que el del proceso de recristalización, aquí se relajan tensiones internas del metal, se suministra energía interna para reordenar las dislocaciones en configuraciones de menor energía. En aluminio se genera una estructura de subgranos con límites de grano de bajo ángulo.



## 1.6 Recristalización

La recristalización se presenta, cuando el material deformado es sometido a un tratamiento térmico de recocido, y al calentar por encima de la temperatura necesaria, se nuclearán nuevos granos libres de deformación a partir de la estructura recuperada, seguidamente de su crecimiento, formando una estructura de granos recristalizado. Estas texturas de recristalización, tamaño y uniformidad de granos, tienen un enorme significado práctico, ya que son responsables de la anisotropía en las propiedades físicas y mecánicas y de sus respectivos valores. [2]

De acuerdo a las teorías clásicas, la recristalización se da a través de dos mecanismos principales: el núcleo aislado que se expande por crecimiento dentro de un grano deformado y el límite de grano de alto ángulo migrando hacia una región del metal más deformado.

El crecimiento de un nuevo grano en expansión durante la recristalización primaria, lleva a un descenso global de la energía interna del metal, debido a la sustitución de regiones deformadas por regiones libres de deformación. En esta etapa la resistencia a la tracción disminuye y la ductilidad aumenta, algunos de los factores importantes que afectan el proceso de recristalización en metales y aleaciones son: la cantidad de deformación previa del metal, la temperatura, la composición del metal o aleación (partículas de segunda fase), el tiempo y el tamaño inicial del grano

En términos generales el fenómeno de recristalización necesita una cantidad mínima de deformación para que sea posible, cuanto menor sea el

grado de deformación (por encima del valor mínimo), mayor es la temperatura necesaria para producir este fenómeno.

### **1.7 Efectos de la temperatura de recocido**

Desde el punto de vista industrial, tanto los tiempos como las temperaturas a las cuales se realizan los recocidos, se mantienen lo más bajo posible, ya que evidentemente estos dos parámetros tienen un gran peso en los costos de producción. El efecto de la temperatura de recocido sobre el tamaño del grano recristalizado no parece estar bien fundamentado, ya que tanto la velocidad de nucleación como la velocidad del crecimiento del grano siguen una ecuación de Arrhenius con casi el mismo valor de autodifusión, se espera que la relación entre la velocidad de nucleación con respecto a la velocidad de crecimiento de grano sea casi constante con respecto a la temperatura. De aquí que el tamaño de grano recristalizado sea probablemente una función débil de la temperatura de recocido [20].

### **1.8 Anisotropía**

La dependencia de las propiedades del material con la orientación de deformación se denomina anisotropía, específicamente anisotropía cristalográfica, la cual resulta de la orientación preferida de los granos producida por deformación severa. Un grano se denomina como una porción del material cristalográficamente homogéneo y su resistencia puede ser altamente anisotrópico al aplicarle una deformación plástica severa lo cual produce una fuerte tendencia de orientación cristalográfica, ahora bien, si una muestra está compuesta por muchos granos (material policristalino), el

comportamiento de este material es parecido en cuanto a la anisotropía de un solo grano (monocristal). La propiedad más afectada es la resistencia de conformación del material, esta resistencia en la dirección perpendicular puede ser mayor o menor que la resistencia en la dirección longitudinal (dirección principal de deformación), dependiendo del tipo de tendencia de la orientación existente. Este tipo de anisotropía es más frecuente en materiales no férreos, especialmente cuando han sido severamente deformados. La anisotropía cristalográfica puede ser eliminada por recristalización, aunque la formación de una textura recristalizada puede causar la reaparición de una etapa de anisotropía. Una manifestación práctica de anisotropía cristalográfica es la formación de “orejas”, o deformaciones no uniformes en procesos de embutido profundo.

## **1.9 Embutibilidad**

La embutibilidad es la característica que describe la factibilidad que presenta el material a ser confinado a un espacio reducido o a una matriz, con el fin de que adopte la forma de ésta.

La embutición es el proceso de conformado en frío por el que se transforma una chapa plana en un cuerpo hueco adaptándola a la forma definida por la matriz, mediante la presión ejercida por la prensa. Se trata de un proceso de conformado de chapa por deformación plástica mediante el cual la chapa sufre simultáneamente transformaciones por estirado y por recalcado produciéndose variaciones en su espesor.

En el método básico de embutición se coloca una pieza bruta de lámina sobre un dado abierto circular y se fija en su lugar con un sujetador de material en bruto o un anillo de sujeción. El punzón desciende y empuja la lámina dentro de la cavidad formando una depresión. Las variables importantes a tomar en cuenta son las propiedades de la lamina metálica, la relación entre el diámetro de la pieza bruta ( $D_o$ ) y el diámetro del punzón ( $D_p$ ), la holgura entre el punzón y el dado ( $C$ ), el radio de tangencia ( $R_d$ ), la fuerza de sujetador de material en bruto, la fricción y la lubricación.

Durante la operación de embutición, el movimiento de la pieza bruta hacia la cavidad induce esfuerzos circunferenciales de compresión en el borde, que tienden a hacer que ésta se pliegue. Se puede reducir o eliminar el plegamiento si se mantiene al sujetador de material en bruto bajo la acción de cierta fuerza. La pared de la depresión que ya se ha formado se somete principalmente a un esfuerzo longitudinal de tensión. El alargamiento hace adelgazar la pared de la depresión; si es demasiado elevado, causa rasgaduras. Debido a las muchas variables que intervienen, es difícil calcular la fuerza del punzón  $F$ , esta aumenta al incrementarse la resistencia, el diámetro y el espesor de la lámina metálica bruta.

En estas operaciones, la generación de defectos suele deberse al adelgazamiento de la pared de la depresión debido a los grandes esfuerzos longitudinales de tensión. Si se sigue el movimiento del material hacia la cavidad del dado, se puede ver que la lámina metálica debe ser capaz de sufrir una reducción de ancho, a causa de la reducción en las direcciones longitudinales; además, la lámina debe resistir el adelgazamiento bajo los

esfuerzos de tensión en la pared de la depresión. La capacidad de embutición profunda se mide, en general, con la relación límite de embutido (RLE).

$$R = \frac{D_O}{D_P}$$

Donde  $D_O$  corresponde al diámetro máximo de lámina bruta y  $D_P$  al diámetro del punzón.

Esta propiedad (RLE) es función de la anisotropía normal,  $R$ , del metal laminado, que también se llama anisotropía plástica. La anisotropía normal se define en función de las deformaciones reales que sufre la muestra a la tensión. Por otra parte, en la embutición, las orillas o bordes de las depresiones se pueden volver onduladas; a este fenómeno se le denomina borde ondulado u orejas. Esta condición se debe a la anisotropía planar de la hoja.

Un factor muy importante que se debe tomar en cuenta al momento de la embutición es la lubricación, esta hace disminuir las fuerzas, aumentar la capacidad de embutición y reducir los defectos en las piezas, así como el desgaste de las herramientas. En general, se debe mantener al mínimo la lubricación del punzón, porque la fricción entre éste y la depresión formada mejora la capacidad de embutición, al reducir los esfuerzos de tensión en la taza o depresión. Para las aplicaciones generales, los lubricantes de uso común son los aceites minerales, soluciones de jabón y emulsiones para trabajo duro. Para aplicaciones más difíciles se usan recubrimientos, cera y lubricantes sólidos.

## CAPÍTULO II

### MARCO METODOLÓGICO

La presente investigación tiene como objetivo determinar la influencia de la temperatura de recocido en la embutibilidad de chapas semirígidas de una aleación de aluminio 8011, en términos de la determinación de la anisotropía normal y planar del material. Se plantea realizar estas investigaciones a partir de muestras provenientes de colada continua sin previo tratamiento térmico de homogeneización ni recocido. Estas muestras serán laminadas en frío hasta un espesor de 30 $\mu$ m, posteriormente se someterán a una serie de tratamientos térmicos de recocido a diferentes temperaturas durante un período de tiempo determinado.

A partir del trabajo especial de grado de Campero, Ildemaro y De Quintal, Alejandro titulado: “*Estudio sobre la factibilidad técnica para la obtención de chapas semirígidas de aluminio sin la aplicación de recocidos intermedios*” [4], se estableció que el intervalo de tiempo en base a las temperatura de recocido que garantiza una estructura de grano totalmente recristalizada va de 10000 a 50000 segundos, es por esta razón que para el presente trabajo de investigación se utiliza un tiempo de 20000 segundos para realizar los tratamientos térmicos de recocido.

#### **2.1 Descripción del material utilizado.**

El material utilizado es una aleación de aluminio 8011 suministrado por la empresa C.V.G. ALUMINIO DE CARABOBO S.A. (ALUCASA), en

láminas y rollos, provenientes de cada etapa del proceso productivo, los cuales fueron posteriormente preparados dependiendo del ensayo a realizar. Dicho proceso productivo descrito en el marco teórico, se modificó para esta investigación, en específico se excluyó el proceso de recocido intermedio. El espesor del material usado en esta investigación es de 30µm.

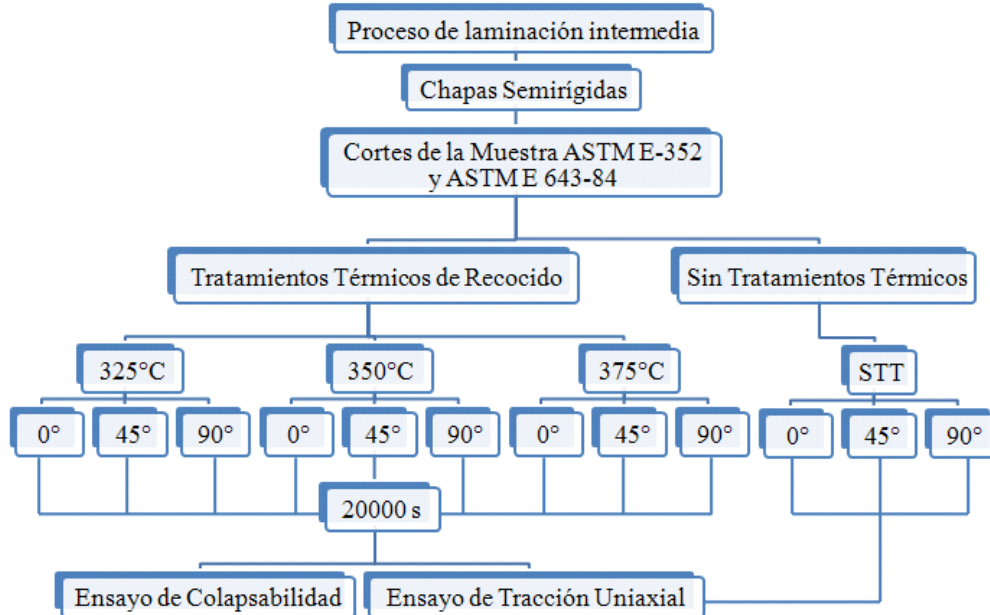
La composición química del material es de gran importancia para evaluar con precisión las propiedades de las chapas y así analizar adecuadamente los resultados de cada ensayo.

Del Rio, Javier y Vándor, Lazlo en su trabajo titulado: “*Estudio sobre la factibilidad técnica para la obtención de fóil de aluminio sin la aplicación de recocidos*” [19], determinaron la composición química del material a utilizar mediante un ensayo de espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama.

**Tabla 2.1.** Composición química del material a estudiar.

<b>Elemento</b>	<b>%wt ± S</b>
Si	0,27 ± 0,01
Fe	0,87 ± 0,07

En la figura 2.1 se presenta un esquema que refleja los pasos a seguir para la realización del presente trabajo:



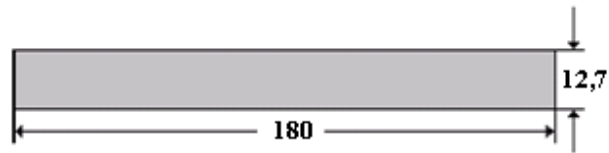
**Figura 2.1.** Esquema del trabajo de investigación.

## 2.2 Preparación de las muestras

### 2.2.1 Ensayo de tracción uniaxial

Los ensayos fueron realizados a probetas provenientes de una chapa semirígida de aluminio de 30 $\mu$ m de espesor. Para realizar los ensayos de tracción se utilizaron probetas planas estándar que cumplen con la norma ASTM E-352, con las dimensiones mostradas en la figura 2.2. Estas probetas fueron obtenidas por medio de una cizalla de doble cuchilla, mostrada en la figura 2.3, en la empresa C.V.G. ALMINIO DE CARABOBO S.A. (ALUCASA).



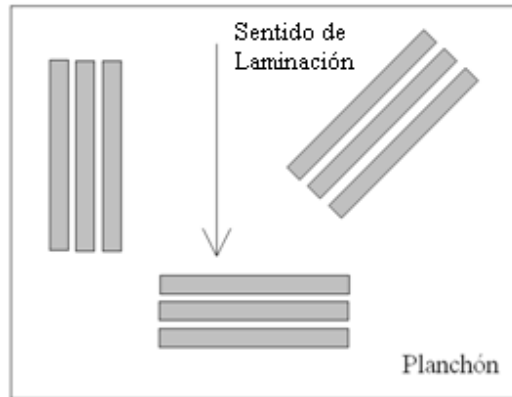


**Figura 2.2.** Dimensiones de las probetas para ensayos de tracción. (Medidas en mm)



**Figura 2.3.** Cizalla de doble cuchilla.

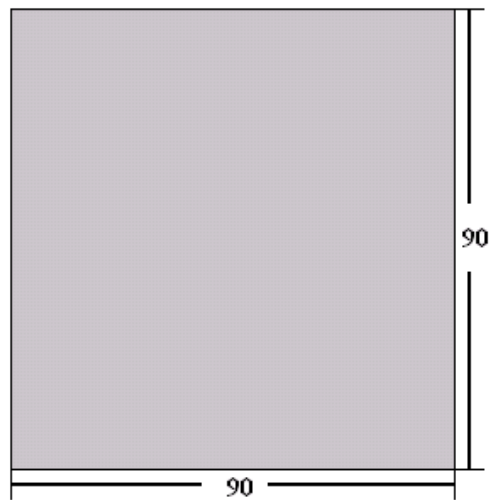
Se cortaron tres muestras para 0, 45 y 90° con respecto al sentido de laminación, como se muestra en la figura 2.4, para cada una de las láminas tratadas y no tratadas térmicamente, a objeto de estudiar la anisotropía del material.



**Figura 2.4.** Grupo de muestras con sus concernientes ángulos con respecto al sentido de laminación.

### 2.2.2 Ensayos de colapsabilidad

Para las muestras, se usó como referencia la norma ASTM E 643-84, con las dimensiones mostradas en la figura 2.5, provenientes de una chapa semirígida de aluminio de 30 $\mu$ m de espesor.

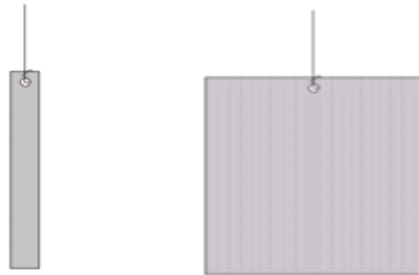


**Figura 2.5.** Dimensiones de las probetas para ensayos de colapsabilidad. (Medidas en mm)

Dicha norma estipula que para cada temperatura y laminas sin tratamiento térmico, se es necesario 3 especímenes para obtener una buena precisión.

### 2.3 Tratamiento térmico de recocido.

Se procedió a realizar los tratamientos térmicos a tres temperaturas distintas: 325, 350 y 375 °C. Dichos tratamientos se efectuaron con las láminas dispuestas como se muestra en la figura 2.6, en un horno de sales con cuatro resistencia eléctrica, cuyas características de trabajo son: 210 V bifásico, potencia 6600 Vatios, temperatura máxima de trabajo 1000° C, que se presenta en la figura 2.7.



**Figura 2.6.** Disposición de las probetas para realizar el tratamiento.



**Figura 2.7.** Horno de resistencia eléctrica para tratamientos térmicos.

Se usó un baño de sales fundidas de Nitrato de Sodio  $NaNO_3$ , con el fin de garantizar que las muestras alcancen la temperatura del tratamiento en un corto tiempo, y de esta forma minimizar otros efectos que permitan la liberación de energía almacenada en el material. Se utilizó un crisol de acero inoxidable con un diámetro de 11 cm y una longitud de 19 cm como contenedor de las mencionadas sales el cual se colocó dentro del horno. Para el control de la temperatura, el equipo cuenta con una termocupla de inmersión de cromel-alumel con un recubrimiento de alta alúmina de diámetro aproximado de 1,5 cm, la cual está conectada a un controlador digital como se presenta en la figura 2.2.

Para cada temperatura de recocido: 325, 350 y 375 °C, se realizaron doce (12) tratamientos térmicos: tres (3) especímenes para cada una de las tres (3) direcciones: 0°, 45° y 90°, con respecto al sentido de laminación, dando un total de veintisiete (27) probetas tratadas térmicamente para la realización del ensayo de tracción y un total de nueve (9) probetas para la realización del ensayo de colapsabilidad. Cada tratamiento térmico se realizó en un intervalo de tiempo de 20.000 segundos, para así garantizar, como se dijo anteriormente, la homogeneidad del tamaño de los granos. Luego cada espécimen fue templado a objeto de retener la microestructura desarrollada para ese instante en particular.

## 2.4 Ensayos mecánicos

### 2.4.1 Ensayo de Tracción Uniaxial

Para realizar este ensayo se utilizó una máquina universal marca INSTRON, mostrada en la figura 2.8, modelo 4208, ubicada en los laboratorios de la empresa CVG Alucasa, bajo las siguientes condiciones: velocidad del cabezal de la máquina de cuatro (4) mm/min, con un intervalo de carga entre 0-50 Kg.



**Figura 2.8.** Máquina universal marca INSTRON.

Las probetas se montaron, una a una, sujetando sus extremos en la máquina universal de ensayo, diseñada para deformar a una velocidad constante, y para medir continua y simultáneamente la carga instantánea aplicada y el alargamiento resultante a través de un display que registra el desplazamiento del cabezal móvil. Es importante destacar que fue necesario

hacer modificaciones a los resultados arrojados en el ensayo, para así, obtener valores de esfuerzo deformación real. Para esto se realizaron correcciones por deformación elástica de elementos de máquina, utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta L_{\text{Experimental}} = \Delta L_{\text{Probeta}} + \Delta L_{\text{Máquina}} \quad 2.1$$

Aplicando la Ley de Hooke

$$F = K \times \Delta L \quad 2.2$$

Ahora sustituyendo la ecuación 2.2 en la ecuación 2.1, tenemos que:

$$\frac{F}{K_{\text{Experimental}}} = \frac{F}{K_{\text{Probeta}}} + \frac{F}{K_{\text{Máquina}}}$$

Despejando  $K_{\text{Máquina}}$

$$K_{\text{Máquina}} = \frac{K_{\text{Probeta}} \times K_{\text{Experimental}}}{K_{\text{Probeta}} - K_{\text{Experimental}}}$$

Finalmente tenemos:

$$\Delta L_{\text{Corregido}} = \Delta L_{\text{Experimental}} - F_i \times \left( \frac{K_{\text{Probeta}} - K_{\text{Experimental}}}{K_{\text{Probeta}} \times K_{\text{Experimental}}} \right)$$

Donde:

$$K_{\text{Experimental}} = \frac{\sum \Delta F_i}{\sum \Delta L_i}$$

$$K_{\text{Probeta}} = E \times \frac{A_o}{L_o}$$

Posteriormente los valores de carga y alargamiento son normalizados para obtener los parámetros esfuerzo nominal y deformación nominal, respectivamente. El esfuerzo nominal (S) se define mediante la relación

$$\text{Esfuerzo Nominal}(S) = \frac{F}{A_o} \quad 2.3$$

En donde F es la carga instantánea aplicada perpendicularmente a la sección transversal de la probeta, en unidades de Newton (N), y  $A_o$  es el área de la sección original antes de aplicar la carga ( $\text{mm}^2$ ). Las unidades de la tensión nominal son medidas en mega pascales, MPa (unidades del Sistema Internacional).

La deformación nominal se define como

$$\text{Deformación Nominal (e)} = \frac{l_i - l_o}{l_o} = \frac{\Delta L_{\text{Corregido}}}{l_o} \quad 2.4$$

En donde  $l_0$  es la longitud original entre mordazas antes de aplicar la carga, y  $l_i$  es la longitud instantánea. Algunas veces la cantidad  $l_i - l_0$  se indica simplemente mediante  $\Delta L$ , y es el cambio de longitud inicial. La deformación nominal no tiene unidades, aunque a menudo se utiliza milímetros por milímetros; el valor de la deformación obviamente es independiente del sistema de unidades.

El esfuerzo nominal ( $s$ ) definida en el ensayo de tracción, en función al área de la sección inicial, no es realmente un esfuerzo instantánea por que el área de la sección transversal  $A_i$  en el instante de la medida de la carga es menor que el área original  $A_0$  usado en el cálculo de  $S$ . Por lo tanto, es preferible considerar el esfuerzo real que opera en un instante dado, definido por la siguiente ecuación:

$$\text{Esfuerzo Real } (\sigma) = \frac{F}{A_i} \quad 2.5$$

La deformación nominal ( $e$ ) definida por el ensayo de tracción es de gran importancia, sin embargo la variable utilizada fue la deformación experimentada por la probeta en un estado determinado (deformación real). Esta deformación real “ $\epsilon$ ” se define en función del incremento de la deformación:

$$\text{Deformación Real } (d\epsilon) = \frac{dl}{l}; \quad \epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad 2.6$$



Como las deformaciones nominales son fáciles de medir y registrar, pero en los cálculos se requieren deformaciones reales, adicionándole la dificultad de obtener los valores de “ $\sigma$ ” a partir del ensayo de tracción, ya que la fuerza y la sección transversal se deben medir simultáneamente; es conveniente calcular los valores reales tanto del esfuerzo como de la deformación en función de los valores nominales como se muestra a continuación:

$$\sigma = \frac{F}{A_i}$$

Partiendo de la premisa de conservación de volumen:

$$\begin{aligned} V_i &= V_o \\ A_i \times l_i &= A_o \times l_o \end{aligned}$$

Por lo tanto

$$\sigma = \frac{F \times l_i}{A_o \times l_o}$$

Como se definió anteriormente

$$S = \frac{F}{A_o}$$

Y de la expresión de la deformación nominal

$$\frac{l_i}{l_0} = 1 + e$$

Finalmente la expresión de esfuerzo real queda

$$\sigma = s(1 + e) \quad 2.7$$

Así mismo, para la deformación real la expresión queda

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + e) \quad 2.8$$

Estas últimas ecuaciones son válidas solamente hasta alcanzar el punto de estricción, es decir, donde existe la estabilidad plástica del material.

#### **2.4.2 Ensayos de Colapsabilidad**

Para realizar este ensayo se utilizó una máquina de colapsabilidad marca MULLEN TESTER, fabricada por B.F. PERKINS, mostrada en la figura 2.9, ubicada en los laboratorios de la empresa CVG Alucasa, bajo el siguiente intervalo de trabajo: 0-300 lbs./sq.in. (Psi).

Es importante destacar que la norma antes mencionada se utilizó únicamente para la preparación de las probetas a ensayar, ya que esta se refiere a un ensayo de embutibilidad de tipo Erichsen, el cual se basa en el uso de un

punzón de acero que ejerce presión sobre una chapa de aluminio que presenta un espesor en un intervalo de 0,2 a 2 mm y presenta un mecanismo de tipo hidráulico para aplicar presiones muy elevadas; mientras que la máquina de colapsabilidad utilizada se basa en un elastómero que se expande, aplicando presión a la probeta haciéndola pasar por un orificio permitiendo que esta adopte la forma de una copa hasta el momento de la ruptura. El tipo de sistema que utiliza la maquina es del tipo neumático, el cual presenta una escala de presión significativamente menor en comparación con la maquina tipo Erichsen.



**Figura 2.9.** Maquina de colapsabilidad.

Donde:

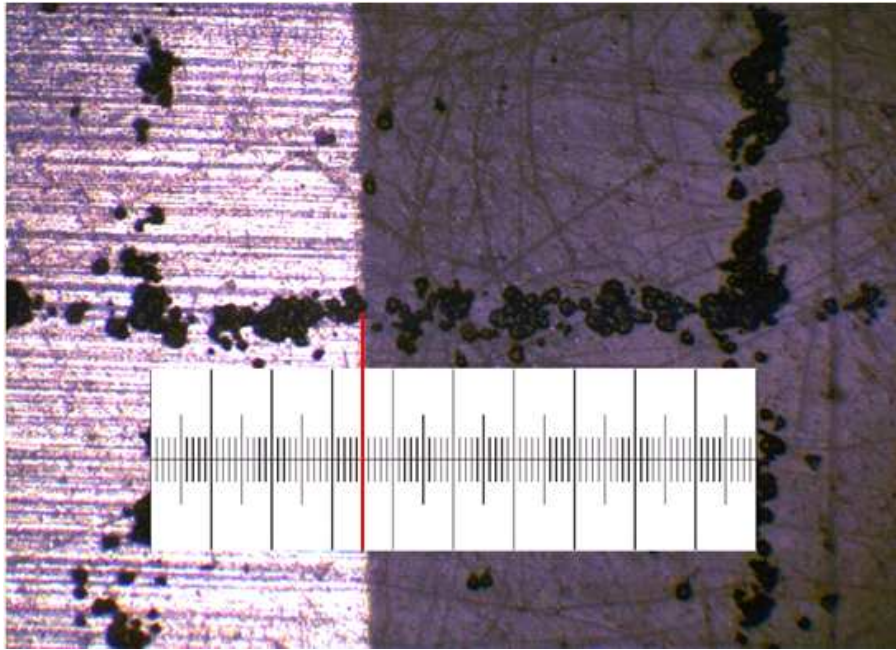
1. Volante de ajuste del sujeta chapas.
2. Porta muestras.
3. Indicadores de presión.
4. Palanca de accionamiento.

## 2.5 Proceso de medición del ancho de las probetas

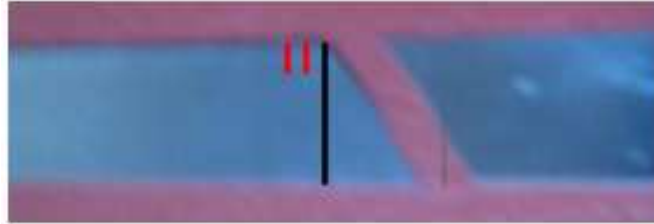
Para realizar las mediciones de espesor final se utilizó un microscopio óptico marca Buehler, modelo Viewmet con las siguientes condiciones de trabajo: 110 V, 60 Hz, el cual se muestra en figura 2.10. Con la ayuda del mismo se realizaron las mediciones a través de un montaje que implica la incorporación de una cuadrícula milimetrada y una marca micrométrica que se muestra en la figura 2.11. En base al trabajo de grado de Campero, I y De Quintal, A [4] se procedió a colocar las probetas sobre la cuadrícula anteriormente mencionada y se tomó como punto de partida la zona de ruptura más corta según la figura 2.12. Se midió dos milímetros desde la zona de ruptura y a partir de este punto se procedió a realizar la medición del ancho final para así lograr una mayor precisión y garantizar que la medición se realizara fuera de la zona de encuellamiento y entonces poder presumir que se mide sobre una región en donde se deforma plásticamente el material en régimen estable y así asegurar la conservación de volumen.



**Figura 2.10.** Microscopio Óptico.



**Figura 2.11.** Cuadrícula milimetrada y marca micrométrica.



**Figura 2.12.** Medición del Ancho de la Probeta.

## **2.6 Anisotropía del material.**

Como se comento antes, la resistencia a la disminución del espesor se mide por medio de la anisotropía la cual es una función de la relación de deformación “R”, medida a lo largo de las distintas direcciones en la pieza; esta es la proporción de la deformación en régimen plástico del ancho y espesor de

una lamina, con este valor se mide la anisotropía normal ( $\check{R}$ ). Un alto valor de  $\check{R}$  indica una alta resistencia a la reducción en la dirección del espesor (dirección normal al plano de la lámina). Ahora bien, la relación de deformación del espesor se halla por medio de la siguiente expresión:

$$R = \frac{\ln\left(\frac{W_0}{W}\right)}{\ln\left(\frac{h_0}{h}\right)} \quad 2.15$$

Donde  $W_0$  y  $W$  son el ancho inicial y el final respectivamente, mientras que  $h_0$  y  $h$  representan los espesores. Como en esta investigación las mediciones de espesor son difíciles de hacer con precisión, la ecuación puede ser reescrita usando la relación de volumen constante:

$$R = \frac{\ln\left(\frac{W_0}{W}\right)}{\ln\left(\frac{L \times W}{L_0 \times W_0}\right)}$$

Como muchas chapas laminadas muestran una variación de propiedades plásticas y elásticas con orientación en el plano de las laminas, es común determinar tanto un valor de anisotropía planar ( $\Delta R$ ) como anisotropía normal ( $\check{R}$ ), promediado por mediciones de “R” tomadas en diferentes ángulos con respecto a la dirección de laminación de la chapa.

$$\text{Anisotropía Normal } (\check{R}) = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad 2.16$$

$$\text{Anisotropía Planar } (\Delta R) = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} \quad 2.17$$

## CAPÍTULO III

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presenta un análisis de los resultados obtenidos a partir del diseño experimental propuesto originalmente, con el objeto de establecer la influencia de la temperatura de recocido, en el grado de conformabilidad de chapas semirrígidas de aluminio. Es importante destacar que para establecer las distintas condiciones de conformabilidad, se procedió a través de dos vías complementarias entre sí. En principio se procura conocer la conformabilidad a partir de cantidades físicas definidas en términos de características intrínsecas del material procesado, en este caso particular, se evalúa la anisotropía, a través de la relación de deformaciones en el régimen plástico tomada en diferentes direcciones con respecto al flujo del material inducido por los rodillos durante la laminación. El otro procedimiento utilizado fue la determinación de la colapsabilidad a través de un ensayo de naturaleza simulativa, como medida del grado de conformabilidad del material, finalmente se trata de correlacionar ambas medidas.

#### **3.1 Caracterización del material.**

En base al trabajo de grado realizado por Vandor, L y Del Rio, J [19], se pudo verificar mediante el estudio de composición química del material (tabla 3.1) y el ensayo de espectrofotometría de absorción atómica que el porcentaje de hierro esta dentro del intervalo nominal, mientras que el Silicio, se encuentra por debajo del rango estándar (tabla 3.2).

**Tabla 3.1** Composición química del material a estudiar.

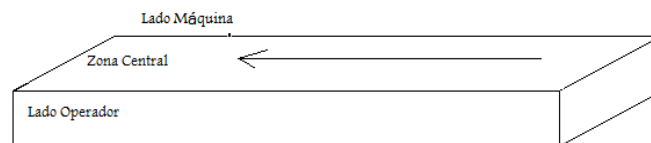
ELEMENTO	% wt $\pm$ S
Si	0,27 $\pm$ 0,01
Fe	0,87 $\pm$ 0,07

**Tabla 3.2** Composición nominal de Hierro y Silicio en la aleación comercial de aluminio 8011.

ELEMENTO	% wt (nominal)
Si	0,50 – 0,9
Fe	0,6 – 1

Esto sugiere que el material a estudiar, debido al Silicio, tiene una buena resistencia mecánica y buena ductilidad, y un relativo alto valor de resistencia a la tracción, fluencia y alargamiento gracias a la presencia del Hierro como aleante adicional. Esto da como resultado un comportamiento mecánico ideal para la obtención de fóil o papel doméstico fino.

Con el fin de evaluar el esfuerzo real a carga máxima a lo largo de la chapa, se definen tres zonas tomando en cuenta la ubicación del operador con respecto a la salida de chapa para su evaluación, siendo la zona operador (la más cercana a este) la que se encuentra a la derecha de la chapa con una vista frontal de la máquina, es decir desde la embobinadora, que es la sección final de la misma (figura 3.1).

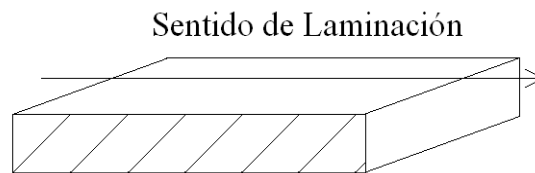


**Figura. 3.1.** Zonas de estudio de la chapa.



Por otra parte estas tres zonas de estudio, lado operador, lado máquina y el centro de la chapa, se evaluaron por medio de microscopía óptica, en sus tres caras con el fin de lograr un mejor entendimiento de las condiciones microestructurales del material proveniente de la colada continua de doble rodillo.

Al analizar el comportamiento microestructural en la superficie denominada sección longitudinal (figura 3.2) para las tres zonas antes mencionadas, se pudo observar que la zona central presenta la mejor distinción de límites de granos, por lo tanto se podría presumir que esta es la que almacena menor deformación.

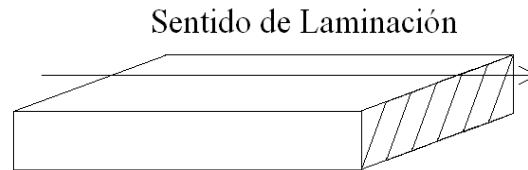


**Figura 3.2.** Sección longitudinal

Adicionalmente se pudo observar que las tres zonas presentaron granos alargados o columnares, lo cual fue caracterizado aplicando el factor de forma el cual arrojó como resultado que los granos más alargados son los del lado máquina y lado operador lo cual evidencia un mayor grado de deformación en los bordes que en la zona central como lo asumido anteriormente.

De igual manera se estudio el comportamiento microestructural en la sección transversal de las muestras (figura 3.3), arrojando resultados similares a lo expresado en la sección longitudinal, siendo la zona central aquella que

presenta mejor distinción en los límites de granos, seguida por el lado maquina y por último el lado operador.



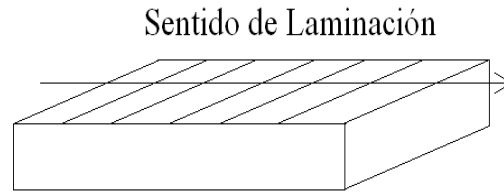
**Figura 3.3.** Sección Transversal

En esta sección también se presentaron estructuras de granos columnares y con el estudio del factor de forma se evidencio que la zona que presenta mayor valor del mismo es la central, por lo tanto presenta menor grado de deformación que el lado maquina y que el lado operador.

Analizando ambas secciones se denoto que los granos en la sección transversal son menos alargados que los presentes en la sección longitudinal. Esto se debe a que en la sección longitudinal se pudo observar el flujo plástico del material en la dirección de colada durante el proceso.

Por último se realizo el estudio microestructural en la sección superficial (figura 3.4) obteniéndose resultados similares a las secciones anteriores, siendo la zona central la que presenta mayor distinción en los límites de granos debido a un menor grado de deformación, a diferencia del lado maquina y del lado operador. En esta sección la estructura de grano presentan un comportamiento relativamente equiaxial lo cual se evidencia con el resultado arrojado en el factor de forma para las tres zona (prácticamente 1), una razón de esta situación puede ser debido a la interacción elástica de los rodillos con el material

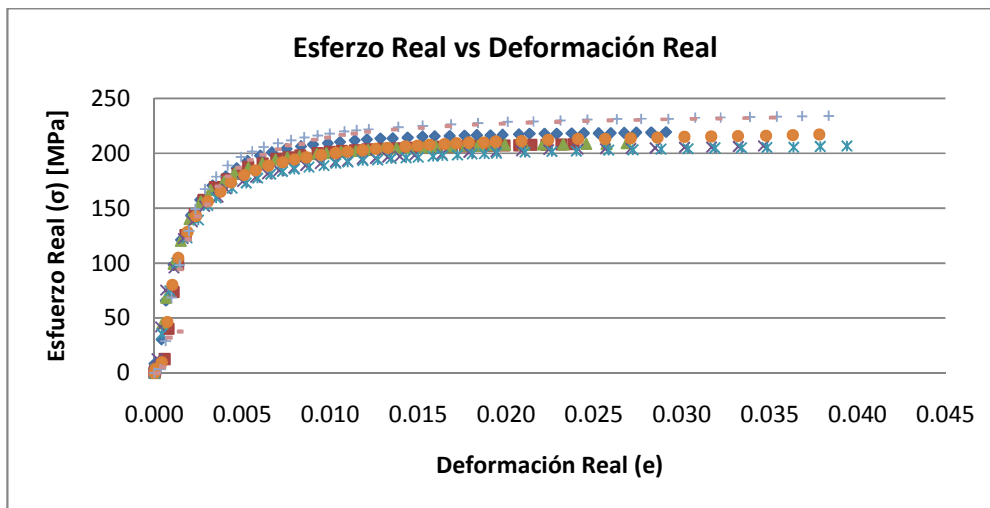
solidificado, al ser sometido a una especie de laminación primaria durante el propio proceso de colada.



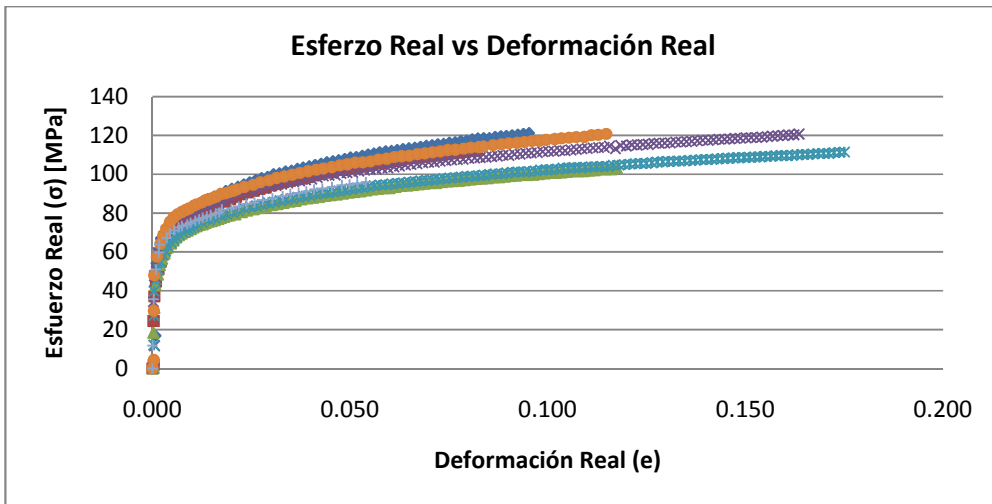
**Figura 3.4.** Sección superficial

### 3.2 Ensayo de Tracción Uniaxial

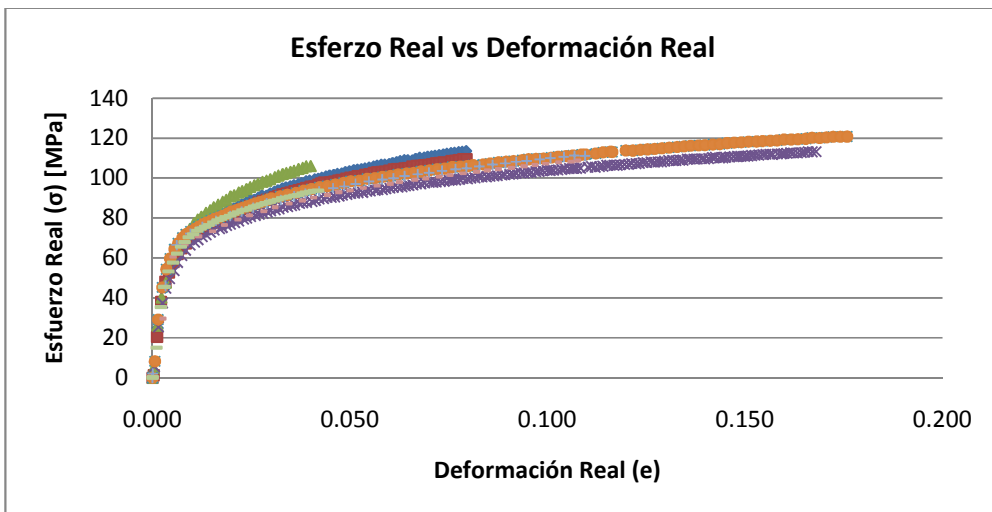
Se realizaron ensayos de tracción uniaxial a cada una de las muestras, obteniendo los datos de carga vs alargamiento. Dichos datos fueron corregidos por el efecto de la deformación elástica de los elementos de la máquina de ensayos mecánicos y subsecuentemente utilizados para la determinación de la curva esfuerzo real vs deformación real, que se presentan en las figuras 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9.



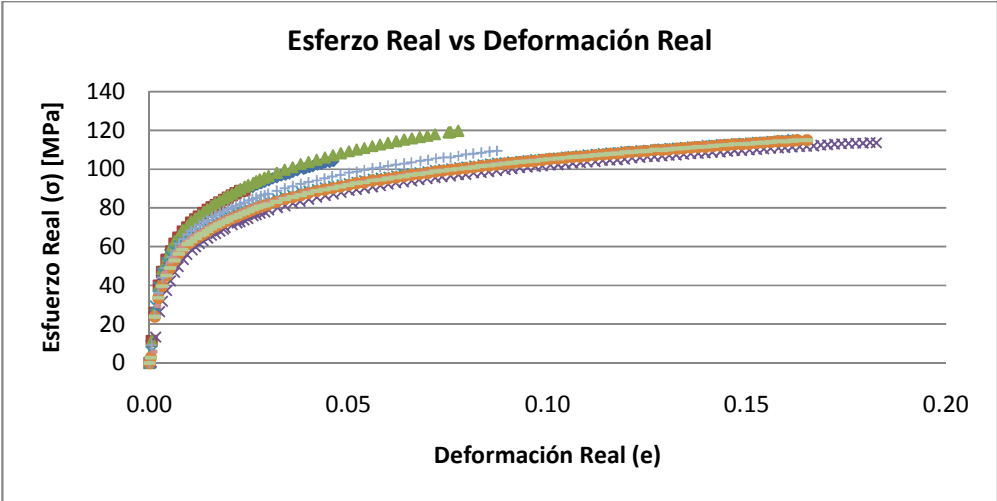
**Figura 3.5.** Curvas de esfuerzo real vs deformación real para especímenes sin tratamientos térmicos



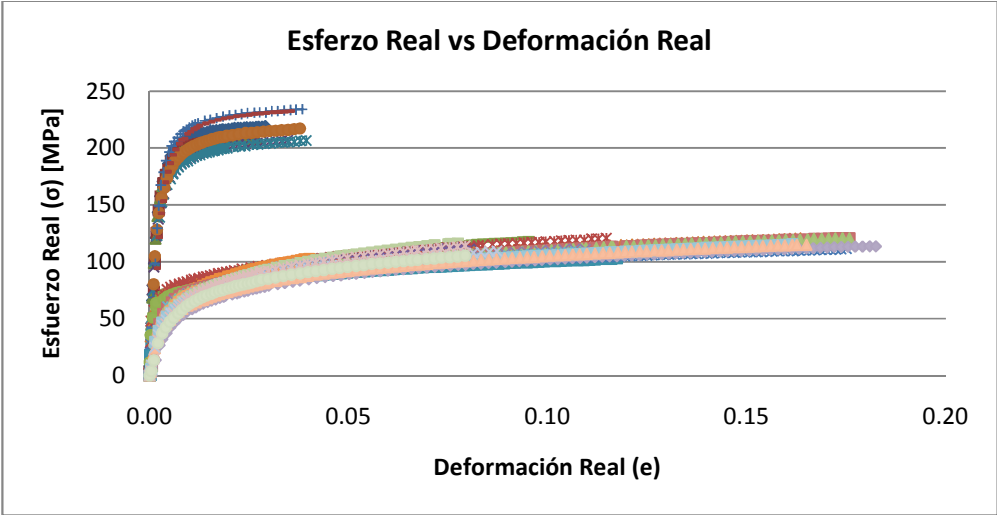
**Figura 3.6.** Curvas de esfuerzo real vs deformación real para una temperatura de tratamiento térmico de recocido de 325 °C.



**Figura 3.7.** Curvas de esfuerzo real vs deformación real para una temperatura de tratamiento térmico de recocido de 350 °C.



**Figura 3.8.** Curvas de esfuerzo real vs deformación real para una temperatura de tratamiento térmico de recocido de 375 °C.



**Figura 3.9.** Curvas de esfuerzo real vs deformación real para todas las probetas ensayadas.

En las figuras presentadas anteriormente se representa en el eje de las abscisa la deformación real y en el eje de las ordenadas el esfuerzo real, medido en MPa; en estas se pueden observar un conjunto de curvas correspondientes a las diferentes temperaturas de recocido evidenciándose al clásico comportamiento elastoplástico, en donde, para los puntos iniciales se observa que el esfuerzo y la deformación son directamente proporcionales, ocasionando un comportamiento lineal en el régimen elástico del material. Luego se puede observar que a partir del punto de fluencia dicho comportamiento deja de existir, lo que quiere decir que se está en presencia de la zona plástica del material. Ya en el régimen plástico en todas las condiciones tratadas se aprecia un cambio progresivo en el régimen de endurecimiento por deformación, las curvas sugieren en principio una pequeña zona en donde el material es altamente susceptible a endurecerse por deformación, pero luego el régimen plástico es caracterizado por presentar una tendencia a experimentar cambios significativos de “m” y sin llegar quizás a alcanzar un estado de saturación absoluto pero si muy bajos valores de endurecimiento por deformación. Este comportamiento explicaría un poco el porqué no se observan cambios importantes en la cinética de recristalización durante el recocido cuando se comparan materiales con distintos grados de deformación pero dentro de un régimen de alta deformación plástica.

Basándose en lo observado en las gráficas presentadas se puede ver un comportamiento recurrente, ya que a medida que se aumenta la temperatura se presenta una mayor deformación, lo cual permite deducir que existe una condición microestructural distinta, que es definitivamente función de la temperatura, tal vez relacionada con la cinética observada en el material durante el recocido la cual es responsable de la restauración de las propiedades del

material. De la estructura de grano obtenida, podríamos decir entonces que para el caso de las menores temperaturas no fue suficiente el tiempo de tratamiento que garantizara una sustitución completa de los granos deformados por estructuras libres de deformación, y así garantizar una estructura de grano homogénea tanto desde el punto de vista de la distribución de tamaños de grano como de el correspondiente factor de forma y textura cristalográfica, lo cual podría estar influyendo en la ductilidad del material tratado.

Al conocer la composición química del material a estudiar se puede decir que el mismo, debido al Silicio, tiene una buena resistencia mecánica y buena ductilidad, y un relativo alto valor de resistencia a la tracción, fluencia y alargamiento, gracias a la presencia del Hierro como aleante adicional. Esto da como resultado un comportamiento mecánico ideal para la obtención de fóil o papel doméstico fino. Es posible explicar la gran diferencia entre el porcentaje en peso de Hierro con el de Silicio; al tomar en cuenta que el Hierro reduce la cantidad de Silicio libre, disminuyendo la tendencia a la fragilidad. Por otra parte, el Silicio se suele añadir en grandes cantidades para proporcionarle mayor colabilidad al material fundido, esta propiedad es de gran importancia al producir piezas fundidas complejas y sin defectos con el uso de moldes, pero en el proceso de Colada Continua esta propiedad no es fundamental, pudiéndose reducir los niveles de este elemento en este proceso en particular. Lo anteriormente descrito, nos permite descartar que las diferencias en el grado de deformación que experimentan las distintas condiciones al ser ensayadas en tracción esté relacionada con una distribución heterogénea del Silicio que propicie localmente una reducción importante de la capacidad de fluir plásticamente el material, ya que de los análisis realizados por espectroscopia de absorción atómica de llama se pudo corroborar un exceso de hierro que

garantizaría el control de silicio libre y por ende la tendencia a la fragilización de la aleación.

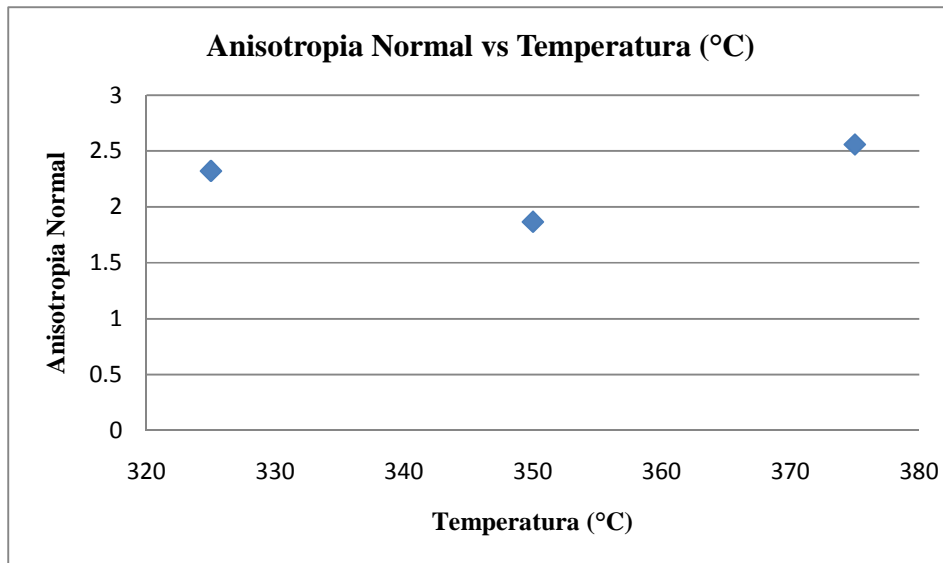
### **3.3 Anisotropía.**

En base a los resultados obtenidos por los ensayos de tracción uniaxial, se llevaron a cabo estudios acerca de la dependencia de las propiedades mecánicas con la dirección en que son medidas dichas propiedades; para esto se analizaron los valores de anisotropía, tanto anisotropía normal ( $\check{R}$ ) como anisotropía planar ( $\Delta R$ ). Estos valores son de suma importancia, ya que son utilizados para establecer la calidad mínima necesaria que debe tener el material para ser sometido a procesos de conformado posteriores a la laminación. El estudio de la anisotropía del material se realizó para cada una de las temperaturas en cuestión (325 °C, 350 °C y 375°C). En el capítulo anterior se explico de manera detallada el cálculo del valor de R, donde este es una relación entre la deformación en el ancho y la deformación en el espesor; para luego determinar la anisotropía normal y anisotropía planar.

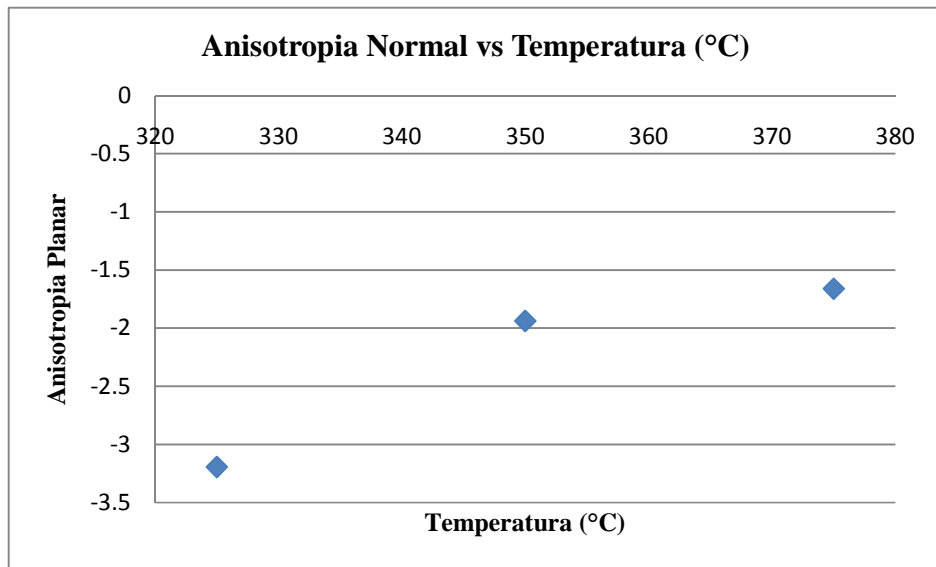
Mediante estudios realizados con anterioridad se ha establecido que el aluminio presenta una buena embutibilidad para valores de anisotropía normal comprendidos entre 0,4 y 1 [7], lo cual observando los resultados obtenidos se puede decir que el material presenta una embutibilidad moderada. Así mismo, los resultados de anisotropía planar permitirán anticipar el orejamiento; mientras menor sea su valor menor será la posibilidad de orejamiento; observando los resultados de anisotropía planar se puede establecer que existe una posibilidad latente de que se produzca el orejamiento, siendo este a 45° del sentido de deformación debido al signo negativo. Por otra parte se puede



observar que los valores de anisotropía normal no presenta una variación pronunciada o comportamiento recurrente, lo cual puede conllevar a establecer que la anisotropía normal es independiente de la temperatura a la cual tiene lugar el proceso de restauración, mientras que la anisotropía planar presenta una disminución en su valor a medida que aumenta la temperatura lo cual hace pensar que a medida que existe un aumento de temperatura, menor será la posibilidad de que se presente el fenómeno del orejamiento como se puede observar en las figuras 3.10 y 3.11.



**Figura 3.10.** Anisotropía Normal del Material de Estudio.



**Figura 3.11.** Anisotropía Planar del Material de Estudio.

Campero, I y De Quintal, A [4] determinaron mediante la cinética de restauración y la variación de la propiedad mecánica con respecto al tiempo (Figura 3.12 y Figura 3.13), que a una temperatura de 375 °C en un rango de tiempo de recocido entre 10000 y 50000 segundos se alcanza una estructura de grano totalmente recristalizada ya que se observa en la grafica, que la propiedad mecánica en un mismo tiempo, no varía con respecto a la dirección de deformación lo cual expresa que la forma del grano es equiaxial, y no presenta la forma alargada en la dirección de laminación debido a la misma. Así mismo ellos expresan que a la temperatura de recocido de 325 °C, no es suficiente el tiempo del mismo de 50000 segundos para que se alcance una estructura de grano totalmente recristalizada, corroborando lo anteriormente descrito con respecto al comportamiento observado en el material en sus distintas condiciones durante los ensayos de tracción uniaxial.

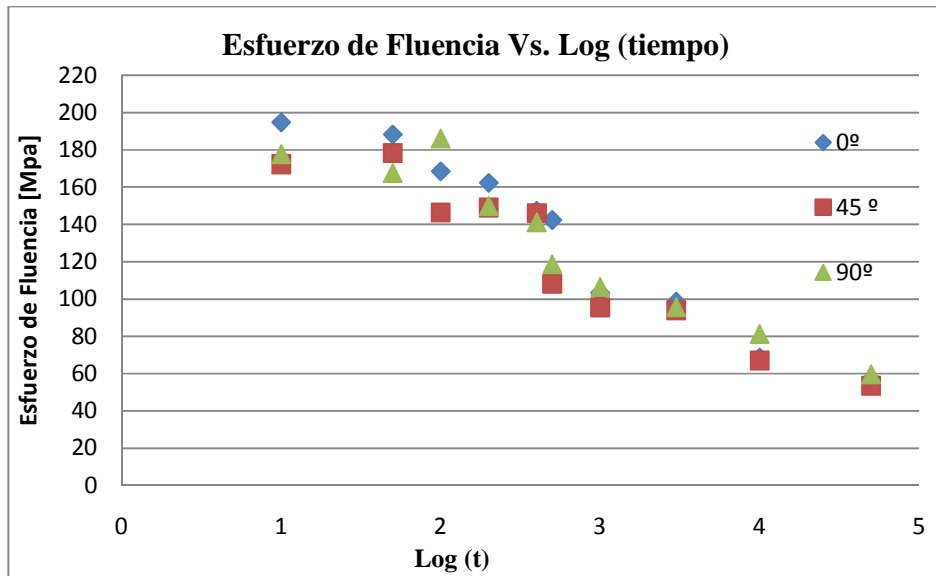


Figura 3.12. Variación de la propiedad mecánica con respecto al tiempo para una temperatura de 325°C.

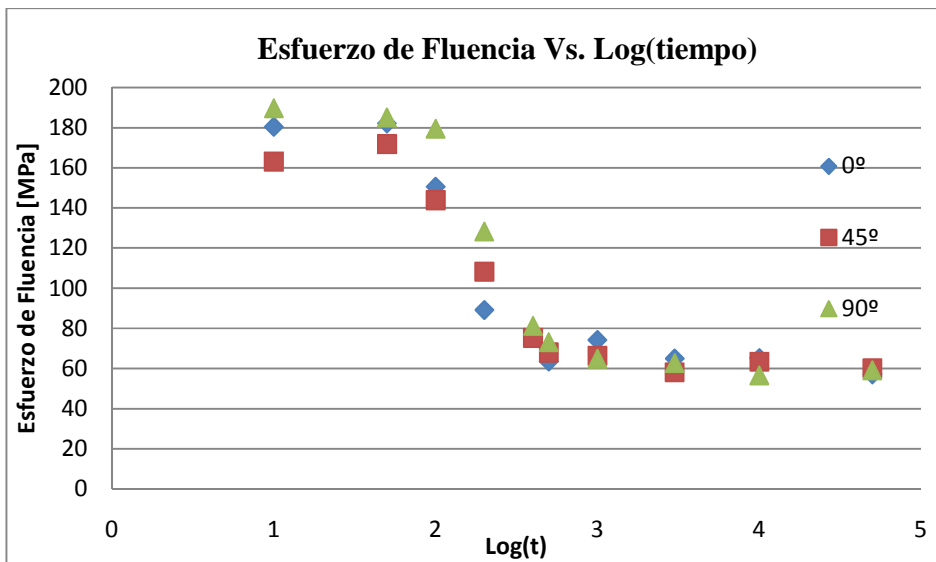
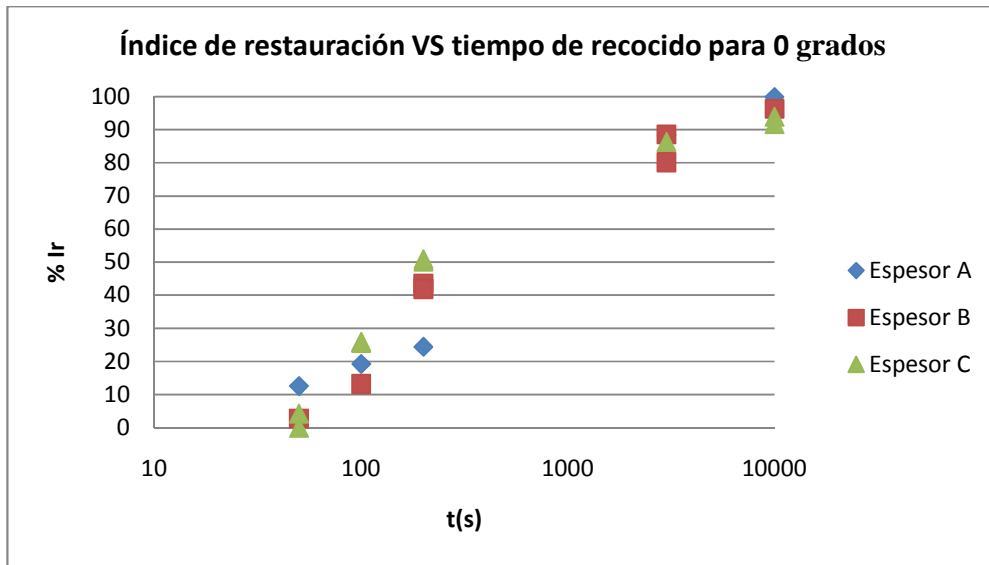


Figura 3.13. Variación de la propiedad mecánica con respecto al tiempo para una temperatura de 375°C.

Del mismo modo Yibrín, Sergio y Arzola, Orlando [22] en su trabajo especial de grado titulado: “*Estudio sobre la conformabilidad de productos planos de aluminio en términos del procesamiento termomecánico primario*” expresan que a medida que incrementa el porcentaje de deformación disminuye el tiempo para alcanzar una determinada fracción restaurada, por ende a mayor cantidad de deformación, mayor energía almacenada y por consiguiente se obtiene el mismo porcentaje de recuperación en un menor tiempo. Sin embargo se puede observar que el efecto que produce la diferencia en los grados de deformación sobre la cinética de restauración de un material donde el porcentaje de deformación previo (energía almacenada) es elevado, es prácticamente insignificante en comparación con las primeras etapas de deformación en el régimen plástico donde el material se endurece por deformación rápidamente, tal como se evidencia en los ensayos de tracción el material alcanza una meseta, es decir, el material experimenta un estado de saturación donde la energía interna almacenada permanece constante, lo cual permite llegar a la conjetura de que el evento de restauración de las propiedades no varía de forma significativa entre una condición y otra (figura 3.14). A pesar que en la presente investigación se trabajo con espesores distintos se podrán argumentar estos resultados a partir de lo obtenido por Campero y De Quintal en términos de la estructura de grano generado en función de la temperatura del tratamiento.

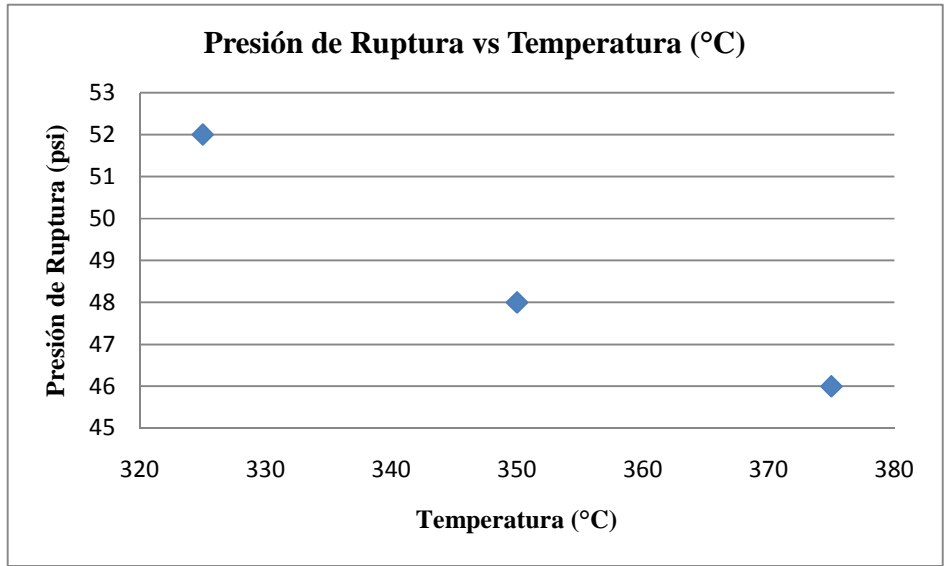


**Figura 3.14.** Índice de restauración vs Tiempo de recocido (0 grados)

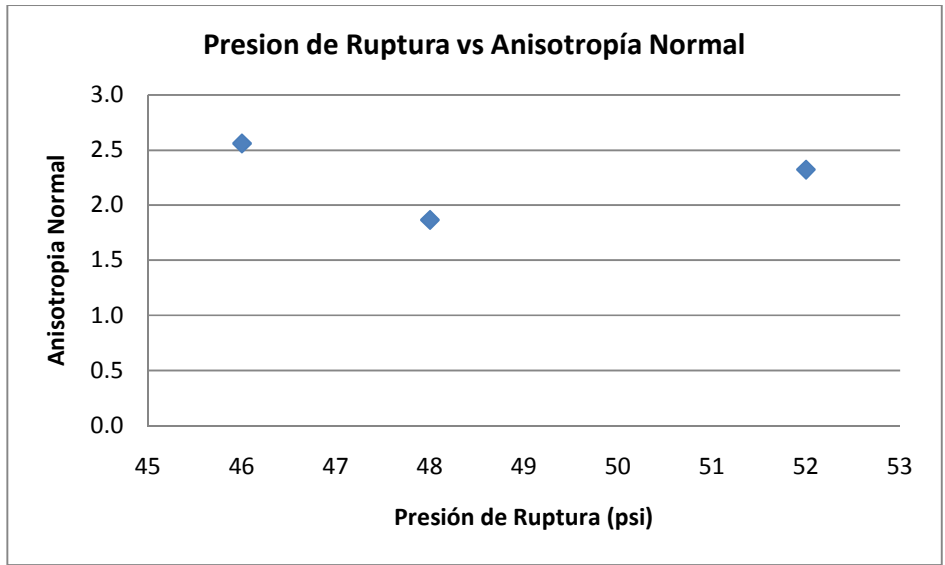
### 3.4 Ensayo de colapsabilidad

Se realizaron ensayos de colapsabilidad en las muestras cortadas según la norma ASTM E 643-84 y previamente tratadas térmicamente; los resultados arrojados en estos ensayos se refieren a la presión de ruptura en base a la temperatura de recocido.

Como se puede observar en la figura 3.15, se destaca que la presión de ruptura varía en función de la temperatura, disminuyendo a medida que aumenta esta, por consiguiente se puede establecer que la conformabilidad se ve afectada por la temperatura de recocido, lo cual se corresponde a los resultados reportados recientemente por Campero y De Quintal; donde este comportamiento debe ser atribuido a una estructura de grano mas equiaxial con mejor distribución en el tamaño de grano.



**Figura 3.15.** Ensayo de Colapsabilidad.



**Figura 3.16.** Relación de presión de ruptura con la anisotropía normal.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES

- De lo observado en las gráficas obtenidas en los ensayos de tracción se puede ver un comportamiento recurrente, ya que a medida que se aumenta la temperatura se presenta una mayor deformación, lo cual permite deducir que existe una condición microestructural distinta, que es definitivamente función de la temperatura.
- Según los valores de anisotropía se puede decir que el material presenta una embutibilidad moderada ya que los valores están cercanos a los sugeridos por la literatura especializada para este tipo de aleaciones.
- La anisotropía normal es independiente de la temperatura a la cual tiene lugar el proceso de restauración, mientras que la anisotropía planar presenta una disminución en su valor a medida que aumenta la temperatura lo cual hace pensar que a medida que existe un aumento de temperatura, menor será la posibilidad de que se presente el fenómeno del orejamiento.
- En base al comportamiento que presenta la presión de ruptura en los ensayos de colapsabilidad, se denota que esta varía en función de la temperatura, disminuyendo a medida que aumenta esta, por consiguiente se puede establecer que la conformabilidad se ve afectada por la temperatura de recocido.

## RECOMENDACIONES

- Evaluar el efecto que podría tener un tratamiento térmico de homogeneización posterior a la colada ya que los resultados obtenidos en la presente investigación sugieren mejores comportamiento en materiales con una mejor distribución de formas y tamaños de grano.
- Realizar ensayos simulativos de embutibilidad que permitan correlacionar carga y alargamiento.
- Realizar otros estudios tendientes a establecer valores de límite de embutibilidad con la anisotropía de estas aleaciones producidas por la empresa CVG-ALUCASA.
- Realizar la evaluación de la estructura de grano y subgrano a través de la técnica de difracción de electrones retrodispersados en barrido y así establecer el efecto de las temperaturas de recocido en función de las texturas cristalográficas desarrolladas posteriores al tratamiento térmico de recocido.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] **Aghaie-Khafri M. and Mahmudi R. (2005).** The effect of preheating on the formability of an Al–Fe–Si alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology* [Revista en línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/html>. [Consulta: 2009, Agosto 22].

[2] **Bay B. and Hansen M. (1992).** Recrystallization in commercially pure aluminum. *Materials Science and Engineering*. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/html>. [Consulta: 2009, Agosto 16].

[3] **Bertini F., Villegas A. (1989).** Comportamiento microestructural de la aleación 6063. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Caracas.

[4] **Campero, I. y De Quintal, A. (2009).** Estudio sobre la factibilidad técnica para la obtención de chapas semirígidas de aluminio sin la aplicación de recocidos intermedios. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Escuela de Ingeniería Mecánica, Caracas.

[5] **Carneiro R. R. (1989).** El aluminio fabricación de sus aleaciones y proceso de fabricación de semiproductos. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Caracas.

[6] **Daroqui F., Gutiérrez C. (1986).** Aleación 6063. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Caracas.

[7] **Dieter George. (1986).** Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Tercera edición. New York, 480 p.

[8] **Estanislao M. (2008).** Aplicaciones del aluminio. Revista Arqhys [Revista en línea]. Disponible <http://www.arqhys.com/arquitectura/aluminio-icaciones.html>. [Consulta: 2009, Julio 24].

[9] **Fawzy A. (2008).** Effect of grain diameter, strain rate and deformation temperature on the work hardening characteristics of Al-0.86 wt%Mn-0.28 wt%Fe. Materials Science and Engineering. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/html>. [Consulta: 2009, Septiembre 15].

[10] **Grupo Pechiney (1987).** Enciclopedia del aluminio, volumen2. España. 399 p.

[11] **Grupo Pechiney. (1987).** Enciclopedia del aluminio, volumen3. España. 412 p.

[12] **Gundlach C., Pantleon W., Lauridsen E. M., Margulies L., Doherty R. D. y Poulsen H. F. (2003).** Direct observation of subgrain evolution during recovery of cold-rolled aluminium. Elsevier science. [Revista

en línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/html>. [Consulta: 2009, Septiembre 10].

[13] **Handbook of Aluminum. (1957).** Aluminum Company of Canada LTD. Canadá.

[14] **Lee S. H., Saito Y., Sakai T. and Utsunomiya H. (2005).** Microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding. *Elsevier Science*. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/html>. [Consulta: 2009, Agosto 20].

[15] **Quadir M.Z., Al-Buhamad O., Bassman L. and Ferry M. (2007).** Development of a recovered/recrystallized multilayered microstructure in Al alloys by accumulative roll bonding. *Elsevier Science*. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/html>. [Consulta: 2009, Julio 10].

[16] **Slámová M., Homola P. and Karlík M. (2006).** Thermal stability of twin-roll cast Al-Fe-Mn-Si sheets accumulative roll bonded at different temperatures. *Materials Science and Engineering*. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/html>. [Consulta: 2009, Octubre 16].

[17] **Solano B., y González E. (1997).** Obtención de láminas de aluminio por el proceso de colada continua. VI Panel Técnico Internacional del Procesamiento del Aluminio y Exposición. Aluder. 79-86.

[18] **The Aluminium Association (2006).** International alloy designations and chemical composition limits for wrought aluminum and wrought aluminum alloys. [Documento en línea] <http://www.quiminet.com.mx/ar7/ar%25E7%25D9%258B%250FD%258Es%255B.htm>. [Consulta: 2009, Julio 2].

[19] **Vandor, L. y Del Rio, J. (2008).** Estudio sobre la factibilidad técnica para la obtención de fól de aluminio sin la aplicación de recocidos. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Escuela de Ingeniería Mecánica, Caracas.

[20] **Verhoeven, J.D. (1987).** Fundamentos de metalurgia física. Editorial Limusa. Primera Edición. México D.F., 347 p.

[21] **Weiner I. (2006).** El aluminio: un metal con aplicaciones singulares. Revista Quiminet [Revista en línea]. Disponible <http://www.quiminet.com.mx/ar7/ar%25E7%25D9%258B%250FD%258Es%255B.htm>. [Consulta: 2009, Junio 20].

[22] **Yibrín, S. y Arzola, O. (2009).** Estudio sobre la conformabilidad de productos planos de aluminio en términos del procesamiento termomecánico primario. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Escuela de Ingeniería Mecánica, Caracas.