

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN MICROESTRUCTURAL EN LÁMINAS DE ALUMINIO AA8011 UTILIZANDO MEDICIONES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los bachilleres: Faustini L., Renzo  
Feliciani B., Ernesto  
Para optar al Título  
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009.

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN MICROESTRUCTURAL EN LÁMINAS DE ALUMINIO AA8011 UTILIZANDO MEDICIONES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Carlos González

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los bachilleres Faustini L, Renzo;  
Feliciani B, Ernesto.  
Para optar al Título  
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009

Caracas, 01 de junio 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:

**RENZO FAUSTINI y ERNESTO FELICIANI**

Titulado:

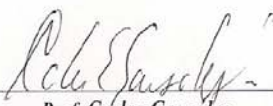
**“ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN MICROESTRUCTURAL EN LAMINAS DE ALUMINIO AA-8011 UTILIZANDO MEDICIONES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA”,**

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

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Crisanto Villalobos  
Jurado



  
\_\_\_\_\_  
Prof. Juan García  
Jurado

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Carlos González  
Tutor

Caracas, 01 de junio 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 se ha decidido otorgar a los Bachilleres:

**RENZO FAUSTINI (C.I.V.- 15.871.368) y ERNESTO FELICIANI (C.I.V.- 16.135.954)**

### **“MENCIÓN HONORÍFICA”**

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

### **“ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN MICROESTRUCTURAL EN LAMINAS DE ALUMINIO AA-8011 UTILIZANDO MEDICIONES DE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA”**

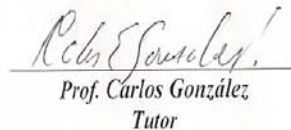
Sin otro particular a que hacer referencia, quedamos de usted.



**Prof. Crisanto Villalobos**  
Jurado



**Prof. Juan García**  
Jurado



**Prof. Carlos González**  
Tutor

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

## AGRADECIMIENTO

*Este trabajo especial de grado no hubiera sido culminado sin la intervención y participación de una serie de personajes, que forman en distinta manera un lugar en nuestras vidas.*

*En primer lugar agradecemos a Dios, por simplemente guiarnos e iluminarnos hasta ahora en el sendero de nuestras vidas.*

*A nuestros padres, por apoyarnos y alentarnos en nuestra carrera.*

*A nuestras novias, por aguantarnos y criticarnos, siempre buscando que seamos mejor.*

*A nuestros amigos por alentarnos, ayudarnos y fastidiarnos en toda nuestra carrera y durante la tesis*

*A el Tutor Carlos González por habernos dado la oportunidad de trabajar con el.*

*Por último pero no menos importante, a “mi compañero” porque aunque nos las vimos difícil seguimos para adelante y a la final lo logramos.*

*Sin intenciones de ser egoistas les agradecemos a todos los aquí nombrado y a todos los que no hemos nombrado.*

*Gracias y éxito*

**Faustini L., Renzo; Feliciani B., Ernesto**

**ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN MICROESTRUCTURAL  
EN LÁMINAS DE ALUMINIO AA8011 UTILIZANDO MEDICIONES  
DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.**

**Tutor académico: Prof. Carlos González. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad  
de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2009, pág. 106.**

**Palabras Claves:** ALUMINIO 8011, CORRIENTES INDUCIDAS,  
CONDUCTIVIDAD ESTRATIFICADA Y VOLUMÉTRICA,  
LAMINACIÓN, EVOLUCIÓN MICROESTRUCTURAL.

**Resumen:** En el presente trabajo se estudiaron los cambios de conductividad eléctrica que presenta la aleación de aluminio AA8011. Las probetas a objeto de estudio fueron obtenidas de la línea de producción de la empresa CVG Alucasa. Estas corresponden a diversos porcentajes de reducción de espesor, mediante laminado en frío. Se logro obtener variaciones en la conductividad estratificada y volumétrica mediante distintos métodos que nos ayudaron de manera distintiva estudiar su comportamiento por las deformaciones ocurridas en el proceso de laminación en frio. Posteriormente, se realizó un seguimiento de la evolución microestructural de las probetas, mediante microscopía óptica y ensayo de dureza.

La medición de conductividad eléctrica se realizo mediante: el método de corriente inducidas (Eddy current), el método de tomografía de Impedancia y el método de las cuatro puntas. Los resultados evidenciaron que a hasta cierto porcentaje de deformación, aumentaba la resistividad y dureza del material. Para las láminas se verifico mediante microscopia óptica, que no hubo recristalización.

Finalmente se concluye, las variaciones en la conductividad eléctrica en láminas de aleación de aluminio AA8011 hasta los porcentajes de reducción considerados, se correlacionan con los cambios en la evolución microestructural.

**Faustini L., Renzo; Feliciani B., Ernesto**

**STUDY OF MICROSTRUCTURAL EVOLUTION  
IN ALUMINUM LAMINAE AA8011 USING  
MEASUREMENTS OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY.**

**Academic tutor: Prof. Carlos González. Thesis. Caracas, U.C.V. Faculty of  
Engineering. School of Mechanical Engineering. 2009, pp 106.**

**Key words: ALUMINUM 8011, INDUCED CURRENTS, STRATIFIED  
AND VOLUMETRIC CONDUCTIVITY, LAMINATION,  
MICROSTRUCTURAL EVOLUTION.**

**Summary:** In the present work the changes of electrical conductivity studied that presents/displays the aluminum alloy AA8011. The test to study object were obtained from the line of production of company CVG Alucasa. These correspond to diverse percentage of thickness reduction, by means of laminate in cold. Profit to obtain variations in the conductivity stratified and volumetric by means of different methods that helped us of distinguishing way to study their behavior by the deformations happened in the process of lamination in cold. Later, a pursuit of the microstructural evolution of the test tubes was realized, by means of optical microscopy and hardness testing..

The measurement of electrical conductivity realized by means of: the induced method of current (Eddy current), the method of tomography of Impedance and the method of the four ends. The results demonstrated that to until certain percentage of deformation, it increased to resistivity and hardness of the material. For laminae was verify by means of optical microscopy, that there was no recrystallization.

Finally one concludes, the variations in aluminum alloy lamina the electrical conductivity AA8011 until the considered percentage of reduction, are correlated with the changes in the microstructural evolution.

# ÍNDICE GENERAL

<i>Contenido</i>	<i>Pág.</i>
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÒRICO</b>	<b>3</b>
2.1. Generalidades del aluminio y sus aleaciones.	3
2.1.1. Generalidades de la aleación AA 8011.	5
2.1.2. Conductividad eléctrica de aluminio.	7
2.1.3. Influencia de los aleantes en la conductividad.	8
2.2. Laminación de pletina plana.	9
2.2.1. Equipo de laminación.	9
2.2.2. Laminado en caliente.	11
2.2.3. Laminado en frío.	12
2.2.4. Trabajo en frío vs trabajo en caliente.	12
2.2.5. Efectos del trabajo en frío sobre las propiedades.	13
2.3. Proceso productivo CVG Alucasa.	15
2.3.1. Área de Fundición	16
2.3.2. Área de Colada	16
2.3.2.1. Horno de retención	17
2.3.2.2. Sistema de Desgasificación y filtraje	18
2.3.2.3. Máquinas de colada	19
2.3.3. Área de laminación gruesa	21
2.3.3.1. Laminador primario	21
2.3.3.2. Recocido intermedio	22
2.3.3.3. Laminador Intermedio	24
2.4. Metalurgia física	25



2.4.1.	Descripción de los cristales.	26
2.4.1.1.	Empaquetamiento atómico de los cristales.	27
2.4.2.	Estructura cristalina.	27
2.4.3.	Deformación plástica.	29
2.4.3.1.	Deformación elástica en la laminación.	30
2.4.3.2.	Sistemas de deslizamiento.	34
2.4.4.	Dislocaciones.	38
2.4.4.1.	Dislocación de Borde.	39
2.4.4.2.	Dislocación de Tornillo.	40
2.4.5.	Recocido.	41
2.4.5.1.	Recuperación	44
2.4.5.1.1.	Mecanismos de recuperación	45
2.4.5.2.	Recristalización	47
2.4.5.2.1.	Mecanismos de Nucleación para la recristalización.	47
2.4.5.3.	Crecimiento de grano.	50
2.5.	Conductividad eléctrica	51
2.5.1.	Método de las 4 puntas.	52
2.5.2.	Método de corrientes inducidas( Eddy current)	54
2.5.2.1.	Parámetros que dependen de las propiedades del material.	56
2.5.2.2.	Tipos de Bobina.	60
2.5.2.3.	Criterios para la selección de la frecuencia AC.	63
2.5.3.	Método de tomografía de impedancia	65
<b>CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.</b>		<b>68</b>
3.1.	Obtención de muestra	69
3.2.	Análisis químico	69

3.3.	Corte y mecanizado de probetas	70
3.4.	Tipos de probetas	71
3.5.	Zona de extracción de las probetas	71
3.6.	Caracterización de las probetas	72
3.7.	Medición de conductividad eléctrica	74
3.7.1.	Ensayo de las 4 Puntas.	74
3.7.2.	Ensayo de corrientes inducidas.	78
3.7.2.1.	Calibración del equipo	81
3.7.2.2.	Procedimiento	81
3.8.	Ensayo de tomografía de impedancia.	83
3.9.	Microscopía óptica.	84
3.9.1.1.	Preparación de la muestra.	84
3.9.1.2.	Observación de la muestra.	88
3.10.	Ensayo de Microdureza.	89
3.10.1.	Preparación de las muestras.	89
3.10.2.	Realización del Ensayo.	89
	<b>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>90</b>
4.1.	Medición de Conductividad.	90
4.1.1.	Método de las 4 Puntas.	90
4.1.2.	Método de las corrientes Inducidas.	93
4.1.3.	Método de Tomografía de Impedancia.	97
4.2.	Microscopía Óptica.	100
4.3.	Ensayo de Microdureza.	103
	<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.</b>	<b>105</b>
	<b>CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES.</b>	<b>106</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>107</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>111</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<i>Pág.</i>
<b>Fig. 1.</b> Clasificación de los laminadores dependiendo del número y disposición de los cilindros. [2]	11
<b>Fig. 2.</b> Efecto en la Conductividad eléctrica materiales puros y aleaciones trabajadas en frío. [11]	14
<b>Fig. 3.</b> Áreas de la línea de producción de Foil Domestico de C.V.G. ALUCASA. [2]	15
<b>Fig. 4</b> Horno de fundición. [2]	16
<b>Fig. 5.</b> Máquinas del área de colada [2]	17
<b>Fig. 6</b> Máquinas del área de laminación gruesa. [2]	21
<b>Fig. 7.</b> a) Diagrama de esfuerzo- deformación. b) Desplazamiento atómico producido por un esfuerzo cortante $\tau$ . [19]	33
<b>Fig. 8.</b> a) Macrovista de estructuras de grano revelada por la línea de deslizamiento. c) Intersección de líneas de deslizamiento en la superficie de una tira Al. [19]	36
<b>Fig. 9</b> Micrografía a 100X mostrando líneas de deslizamiento y límites de grano en Al.. [19]	36
<b>Fig. 10.</b> Sistemas de deslizamiento en cristales ccc <sub>a</sub> [19]	37
<b>Fig. 11.</b> La dislocación de borde. a) Dos dimensiones, b) Tres dimensiones. [19]	39
<b>Fig. 12.</b> Dislocación de tornillo. [19]	40
<b>Fig. 13.</b> Representación esquemática del recocido [19]	43
<b>Fig. 14.</b> Variación de algunas propiedades físicas durante el recocido. [19]	43
<b>Fig. 15.</b> Esquema del ensayo de cuatro puntas.	53

<b>Fig. 16.</b> Representación esquemática de la técnica de inspección por corrientes Parásitas, o Eddy. [29]	55
<b>Fig. 17.</b> Densidad de corriente vs profundidad relativa.[28]	59
<b>Fig. 18.</b> Profundidad de penetración para distintos materiales a distintas frecuencias [3]	60
<b>Fig. 19.</b> Bobinas de superficie [28]	61
<b>Fig. 20.</b> Bobina exterior [28]	62
<b>Fig. 21.</b> Bobina para interiores [28]	63
<b>Fig. 22.</b> Disposición para la captura de datos experimentales. Los círculos concéntricos representan equipotenciales. Se determinan las diferencias de potencial para distancias de los electrodos desde 0,1 mm hasta 2,0 mm con un espaciamento de 0,1 mm. El grosor de la lámina es de 2,15 mm. $h=e/11$	65
<b>Fig. 23.</b> Organigrama general del procedimiento experimental propuesto.	68
<b>Fig. 24.</b> Fresadora del Taller de Maquinas Herramientas de Post-grado del Edificio de Física de la FI-UCV.	70
<b>Fig. 25.</b> Esquema de probeta plana utilizada para realizar los ensayos de conductividad.	71
<b>Fig. 26.</b> Zonas de extracción de las probetas en el planchón de aluminio, (A) probeta perpendicular al sentido de laminación, (B) probeta paralela al sentido de laminación.	72
<b>Fig. 27.</b> Probetas Longitudinales, ordenas por reducción de espesor.	73
<b>Fig. 28.</b> Esquema del montaje del ensayo de 4 puntas.	75
<b>Fig. 29.</b> Montaje del ensayo 4 puntas.	77
<b>Fig. 30.</b> Esquema del ensayo corrientes inducidas.	82
<b>Fig. 31.</b> Ensayo de Corrientes Inducidas	83

<b>Fig. 32.</b> Esquema del ensayo de tomografía de impedancia.	84
<b>Fig. 33.</b> Banco experimental para ensayo de Tomografía de Impedancia.	84
<b>Fig. 34.</b> Embutidora Prestospress marca Struers.	85
<b>Fig. 35.</b> Esquema de extracción de muestras para realizar ensayo de metalografía, (A) montaje de muestra superficial, (B) montaje de muestra transversal y muestra longitudinal.	86
<b>Fig. 36.</b> (a) Pulidora Metaserv 3000 variable speed grinder-polisher marca Buehler, (b) Equipo de pulido manual Lunn Major marca Struers. c) Contacto eléctrico.	87
<b>Fig. 37.</b> Microscopio Viewmet marca Buehler, Cámara Megapixel Firewire marca Pixelink.	88
<b>Fig. 38.</b> Microdurómetro Metallux marca Leitz.	89
<b>Fig. 39.</b> Gráfica Conductividad Vs % Deformación, por el Método de las Cuatro Puntas	91
<b>Fig. 40.</b> Gráfica de curvas de calibración para distintas frecuencias para Corrientes Inducidas.	94
<b>Fig. 41.</b> Gráfica de resistividad vs % de disminución del espesor para todas las frecuencias.	95
<b>Fig. 42.</b> Gráfica de conductividad vs % de disminución del espesor.	96
<b>Fig. 43.</b> Gráfica Conductividad estratificada y volumétrica vs % deformación. Tomografía de impedancia.	97
<b>Fig. 44.</b> Gráfica de conductividad eléctrica vs % deformación mediante las 3 técnicas.	99
<b>Fig. 45.</b> Metalografía de la probeta 6T proveniente de colada continúa.	101
<b>Fig. 46.</b> Metalografía de la probeta 5T (49% de deformación).	101

<b>Fig.47.</b> Metalografía de la probeta 4T (75% de deformación).	102
<b>Fig.48.</b> Metalografía de la probeta 3T (92% de deformación).	102
<b>Fig. 49.</b> Grafica de Dureza vs % de disminución de espesor	103
<b>Fig. 50.</b> Grafica de Dureza y Resistividad vs % de deformación.	104

## ÍNDICE DE TABLAS

	<i>Pág.</i>
<b>Tabla 1.</b> Conductividad y resistividad de varias aleaciones de aluminio. [36]	8
<b>Tabla 2.</b> Pases del laminador primario. [2]	22
<b>Tabla 3.</b> Parámetros de uso de los hornos de recocido intermedio. [2]	23
<b>Tabla 4.</b> Pases del laminador intermedio. [2]	24
<b>Tabla 5.</b> Propiedades físicas, influencia del arreglo y de los defectos atómicos y influencia de la microestructura. [19]	25
<b>Tabla 6.</b> Poder de resolución de los microscopios de mayor uso en metalurgia [19]	28
<b>Tabla 7.</b> Muestras de algunas texturas de conformado en frío. [19]	38
<b>Tabla 8.</b> Composición química del aluminio AA 8011. [1]	69
<b>Tabla 9.</b> Composición química del material a estudiar.	70
<b>Tabla 10.</b> Espesor de probetas	73
<b>Tabla 11.</b> Medidas de profundidad estándar de penetración	80
<b>Tabla .12</b> Valores de resistividad y conductividad obtenida para el método de 4 puntas.	92
<b>Tabla 13</b> Datos de conductividad y resistividad calculada a varias frecuencias por corrientes inducidas.	94
<b>Tabla 14</b> Valores de resistividad y conductividad en función del % de disminución de espesor.	96
<b>Tabla 15</b> Variación de la conductividad eléctrica (Volumétrica y estratificada) con el % de deformación.	98

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

El aluminio tiene propiedades que lo hacen atractivo para diversas aplicaciones: es ligero, presenta buena resistencia a la corrosión y una elevada relación resistencia/peso, además la fabricación de láminas de aluminio mediante colada continua aporta importantes ventajas sobre los procesos de fabricación convencionales, tales como un menor consumo de energía, mayor productividad y reducción de costos operacionales. En este proceso, el metal líquido procedente de los hornos de fusión entra en la máquina de colada continua, donde es enfriado entre dos bandas refrigeradas, siendo conducido directamente desde allí al tren de laminación. La elevada velocidad de enfriamiento del proceso favorece la formación de defectos que limitan las condiciones óptimas para su comercialización. Por una parte, durante la solidificación se genera un fuerte gradiente térmico a través de la sección de la banda obtenida, mientras que, por otra parte, queda un elevado porcentaje de elementos en solución sólida sobresaturada, lo que tiene importantes consecuencias metalúrgicas.

Estos defectos que se pueden generar en las láminas de aluminio en un proceso de colada continua representan pérdidas para las empresas que trabajan con este tipo de producto y por esta razón se han desarrollados diversos ensayos tanto destructivos como no destructivos, para prevenir a tiempo la generación de estas discontinuidades, para así poder corregir el proceso de fabricación.



Se denomina ensayo no destructivo a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de manera permanente su forma física, química, mecánica o dimensional. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo. Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no alteren la aptitud para el servicio del material o componente ensayado.

Entre los ensayos no destructivos destaca una técnica denominada Corrientes Inducidas. Esta técnica presenta un gran número de aplicaciones que van desde la detección y localización de discontinuidades hasta la determinación de características físicas de los materiales entre las cuales podemos mencionar: medición de espesor de recubrimientos, determinación de conductividad eléctrica y permeabilidad magnética, diferenciación de materiales en base a su composición, dureza, microestructura, etc. Además esta técnica posee las siguientes ventajas: gran sensibilidad en la detección de discontinuidades superficiales, la señal que indica la presencia de discontinuidad, se produce de manera inmediata, no se necesita un contacto directo entre pieza y el ensayo puede ser automatizado, no necesita preparación superficial rigurosa y tiene una gran variedad de aplicaciones.

El objetivo fundamental de este trabajo especial de grado, es estudiar la evolución microestructural del aluminio AA8011 usando mediciones de conductividad eléctrica.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Generalidades del aluminio y sus aleaciones

El aluminio es el segundo elemento metálico más abundante en la tierra y su aspecto, su peso ligero, sus características físicas, sus características mecánicas y su resistencia a la corrosión, hacen que este metal y sus aleaciones sean las más atractivas y económicas para muchas aplicaciones en la ingeniería. [1]

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. [3]

El aluminio tiene una densidad de 2.7 g/cm<sup>3</sup>, aproximadamente la mitad de la del acero (7.83 g/cm<sup>3</sup>), del cobre (8.93 g/cm<sup>3</sup>), o del latón (8.53 g/cm<sup>3</sup>). Presenta una excelente resistencia a la corrosión en la mayoría de los ambientes, incluyendo la atmósfera, el agua (agua salada), los productos petroquímicos y muchos sistemas químicos. [1]

Una propiedad que ha ganado importancia con el paso del tiempo es la reciclabilidad de este metal, este proceso secundario de producción de aluminio ha tomado gran importancia en la industria ya que ayuda a reducir la gran demanda de energía que se necesita para proceso de obtención del aluminio. [2]

Los principales elementos aleantes del aluminio son: cobre, silicio, magnesio, zinc y manganeso. Los elementos que se utilizan para adiciones especiales son: níquel, cobalto, plata, litio, vanadio, circonio, estaño, plomo, cadmio y bismuto. En cantidades pequeñas pueden presentarse como impureza o como aditivos: hierro, cromo, y titanio. [4]

Se utiliza un sistema para identificar las distintas aleaciones de aluminio que consiste en cuatros dígitos, el primero de ellos indica el principal elemento aleante, el segundo dígito se refiere a cambios en la composición de los límites de impurezas o en los elementos aleantes originales y los dos últimos en el caso de la serie 1xxx reflejan el porcentaje mínimo de aluminio por encima de 99,00% y para la otras series estos dos últimos dígitos solo sirven para identificar las aleaciones de aluminio en el seno del grupo. [5]

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.

Debido a su poco peso y a que se moldea fácilmente, es muy usado en contenedores, envoltorios flexibles, botellas y latas de fácil apertura. Es importante destacar que el reciclado de dichos recipientes es una medida de conservación de la energía cada vez más importante, ya que requiere sólo un 5% de la energía necesaria para producir el metal primario inicial [3]

### **2.1.1. Generalidades de la aleación AA 8011**

La aleación estudiada en la presente investigación pertenece a la serie 8XXX, del grupo de las aleaciones nuevas de aluminio. Es conveniente destacar que la serie 8xxx (serie asignada para las nuevas aleaciones de aluminio) no presenta 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. [4]

Esta aleación presenta poca susceptibilidad a los tratamientos térmicos, solo presentan fenómenos de recuperación, recristalización, crecimiento de grano, precipitación y solubilización. Esta aleación sólo es endurecible por deformación. [4]

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. [2]

El hierro es la impureza más común encontrada en el aluminio e influye en las propiedades del mismo ya que aumenta la resistencia a la tracción,

fluencia y alargamiento. La solubilidad del hierro en el aluminio se encuentra entre 0,006% y 0,52% en el punto eutéctico, este bajo valor de solubilidad genera partículas intermetálicas incoherentes (Al-Fe-Si) las cuales actúan como dispersores de la deformación plástica. Además el hierro reduce cantidad de silicio libre lo cual mejora la tendencia a la fragilidad de la aleación. [4]

El silicio es soluble en aluminio a temperatura eutéctica de 577 °C hasta un 1,67%, la incorporación de este elemento en la aleación mejora la resistencia mecánica de la misma sin afectar su ductilidad y resistencia a la corrosión. [4]

La serie 8xxx ha sido utilizada en Europa. En Venezuela esta aleación está referida bajo la denominación 8011-M, por la empresa C.V.G. ALUCASA, la cual elabora desde papel doméstico (foil) hasta techos, pasando por mantos asfálticos e impermeabilizantes y ductos. Además esta empresa produce foil semirrígido, 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 alimentario (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. [2]

### 2.1.2. Conductividad eléctrica del aluminio [6]

La resistividad del aluminio más puro (99,999%) perfectamente recocido, es de  $2,630 \mu\Omega \text{ cm}^2/\text{cm}$  a 20 C. Se puede relacionar esta característica con la del cobre a la misma temperatura ( $1,724 \mu\Omega \text{ cm}^2/\text{cm}$ ) y decir que la conductibilidad del aluminio es el 65,45% de la 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 conductividad del aluminio comercial o de sus aleaciones es inferior a este valor. Se la puede concebir de una manera simplificada admitiendo que la conductividad eléctrica se debe a la circulación de los electrones en el metal. Por consiguiente se encuentra en relación con el número de electrones libres y con su libertad de circulación en la masa del metal. Los electrones son frenados por sus choques con los átomos y se puede concebir que la conductividad eléctrica resulte afectada por todo aquello que destruye la continuidad de la materia a cualquier escala: atómica, microscópica o macroscópica. De esta manera puede explicarse que la conductividad del aluminio resulte disminuida, en primer lugar, por las impurezas que contenga.

### 2.1.2.1. Influencia de las principales impurezas en la conductividad.[6]

**Hierro:** Dentro de los límites de la solubilidad del hierro a temperatura ordinaria, la disminución de la conductividad con el contenido en hierro es muy rápida, es sensiblemente lineal, con un coeficiente de 0,75% de la conductividad del Cu para un 0,01% de Fe en peso. El límite de solubilidad del hierro es del orden del 0,003% y puede descender aun hasta el 0,0015% en presencia de otras impurezas como el Si y Cu.

**Silicio:** Lo mismo que para el hierro, la influencia del silicio en una adición del 0,01% de este elemento afecta cada vez menos la conductibilidad a medida que aumenta el contenido total en silicio; asimismo conviene considerar separadamente el caso del estado templado y el estado recocido con enfriamiento lento.

**Tabla 1.** Conductividad y resistividad de varias aleaciones de aluminio. [28]

<i>Aleación de Aluminio</i>	<b>Conductividad</b>		<b>Resistividad</b>
	(% IACS)	(Siemens/m)	(Ohm-m)
1100	57.00 - 61.80	3,45E+10	2,90E-05
2014-F and -0	48.60 - 50.70	2,88E+10	3,47E-05
2024-T36	29.10 - 29.50	1,70E+10	5,88E-05
3003-O	44.70 - 49.80	2,74E+10	3,65E-05
3003-H14 and -H12	37.80 - 51.50	2,59E+10	3,86E-05
4032-T6	35.30 - 36.30	2,08E+10	4,82E-05
5050	48.30 - 49.80	2,85E+10	3,52E-05
6053	39.30 - 48.00	2,53E+10	3,95E-05
7072	60.00 - 60.10	3,48E+10	2,87E-05

## **2.2. Laminación platina plana**

La laminación de láminas es un proceso primario en el que se emplean rangos plásticos tanto por encima como por debajo de la recristalización a fin de preparar los metales para trabajo adicional o para fabricación. El metal presentado en el área pequeña de los rodillos se mueve en sentido longitudinal y extendiéndose muy poco en lo ancho. [7]

Este es uno de los procesos más generalizados para el trabajo de los metales, es por ello que se presta mejor para elevadas producciones y permite tener un mejor control de las propiedades finales. [2]

Al deformar los metales se someten a grandes tensiones normales por parte de los cilindros y a tensiones superficiales de cizallamiento originadas por la fricción entre los rodillos y el material.

Los trenes de laminación se utilizan mucho, tanto en el conformado en caliente como en el conformado en frío de muchos metales y aleaciones, en una amplia gama de tamaños.

### **2.2.1. Equipos de laminación. [2]**

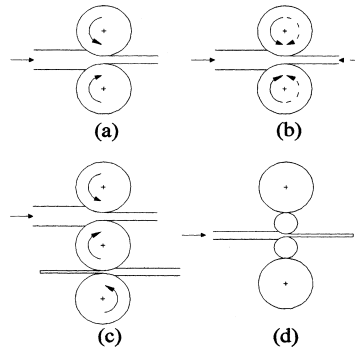
Un laminador se compone principalmente de: los cilindros, el sistema de accionamiento para aplicar la fuerza motriz a los cilindros y para el control de la velocidad, los cojinetes y las columnas que soportan los cilindros. Las fuerzas que intervienen en la laminación llegan fácilmente a los millones de



kilogramos fuerza, de allí que se requieren construcciones robustas y de motores grandes para alcanzar las fuerzas y velocidades necesarias.

Las laminadoras se pueden clasificar dependiendo del número y disposición de los cilindros. El tipo más sencillo y corriente es el sistema Dúo, que se muestra en la figura 1 (a), y que consta de dos cilindros de acero de gran diámetro, los cuales habitualmente son arrastrados por un motor reductor, en este tipo de laminadores, los cilindros alcanzan una velocidad tangencial que varía entre 30 y 60 m/min. Se logra una mejora en cuanto a la rapidez de las laminaciones en el laminador de tipo Dúo Reversible, mostrado en la figura 1 (b), en el que el material puede pasar hacia delante o hacia atrás entre los cilindros invirtiendo el sentido de rotación de los mismos.

Otro sistema es el Trío, mostrado en la figura 1 (c), que se vale de tres cilindros de los cuales el central es oscilante de manera de acercarse a los exteriores, para alcanzar la adecuada abertura de laminación. El sistema más comúnmente utilizado para laminación es el sistema Cuarto reversible, mostrado en la figura 1 (d), el cual permite tener mayor uniformidad en el espesor de la lámina en sentido transversal, obtener reducciones “m” por pasada y una notable disminución en la potencia necesaria. Su esquema comprende dos cilindros de trabajo en contacto con el metal, sostenidos por dos cilindros guías de apoyo, lo que garantiza en forma constante la líneas de pasada del material.



**Fig. 1.** Clasificación de los laminadores dependiendo del número y disposición de los cilindros. [2]

### 2.2.2. Laminado en caliente (trabajo en caliente)

Se realiza a temperaturas superiores a la de recristalización, por reducción continua reversible de espesor, a presión constante, a través de un par de cilindros. En el sentido estricto, el término de laminación en caliente, debería aplicarse únicamente a la laminación de una placa con una temperatura tal, que la recristalización se produjese de manera espontánea casi con la misma rapidez con que se alteran las propiedades del material por la deformación, de tal forma que, al final de la operación el material quedase completamente recocido, aunque en la práctica la laminación se realiza a una temperatura inferior a la de recocido [8,7].

Esta operación también mejora las propiedades del metal fundido, rompiendo la estructura de fundición y refinando el tamaño de grano, obteniéndose una mejor homogeneidad y una mayor tenacidad y resistencia. [9]

### **2.2.3. Laminado en frío (trabajo en frío)**

No se puede expresar con exactitud la temperatura que define el límite superior de las zonas de trabajo en frío, puesto que varía tanto con la composición como con la cantidad de deformación, una regla empírica es suponer que la deformación plástica corresponde al trabajo en frío si éste se efectúa a temperatura menores que la mitad del punto de fusión [10]

Dado que en la mayor parte de los casos no ocurre recuperación a esta temperatura, las propiedades del metal se alteran en la dirección de la resistencia y fragilidad creciente en todo el proceso de trabajo y, en consecuencia, hay un límite hasta el cual se puede trabajar en frío sin peligro de generar fractura. Este proceso ha adquirido una gran importancia en el sector industrial, ya que por medio de él se obtienen una gran variedad de productos y materiales, tales como láminas, chapas finas, chapas extrafinas y flejes, entre otros; los cuales presentan un buen acabado superficial y una buena resistencia mecánica, a la vez que se consigue una gran precisión en las dimensiones del producto.

### **2.2.4. Trabajo en caliente vs. trabajo en frío**

La mayoría de las formas metálicas se producen a partir de lingotes colados. Para fabricar placas, el método más económico es el de trabajo en caliente; sin embargo en el caso del acero, trabajar en caliente el material hace que reaccione con el oxígeno conforme se enfría, propiciando una formación de óxido en la superficie (escamas) que puede producir dificultades durante la operación de maquinado.

No es posible fabricar material trabajado en caliente a un tamaño exacto, debido a los cambios dimensionales que tienen lugar durante el enfriamiento, en cambio el material trabajado en frío puede mantenerse a estrechas tolerancias; está libre de escamas superficiales, pero requiere de mayor potencia para deformar; por tanto es más costoso producirlo.[11]

#### **2.2.5. Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades**

En la realización del proceso de laminado se suelen presentar defectos superficiales debido a que el aluminio y sus aleaciones, débilmente aleadas, son muy blandas, por lo que la superficie del material sometido al proceso presenta las huellas de los cilindros. También puede existir falta de uniformidad en el espesor de la lámina, que se presenta en forma de ondulaciones y/o abolladuras en las orillas; esto se puede evitar disminuyendo la reducción de espesor por pasada.

Otro de los posibles defectos son los rayones y las adherencias de metal. El primero, se produce en la superficie del material, cada una de ellas constituida por una línea estrecha de unos pocos milímetros de longitud y una profundidad que oscila entre unas décimas y unas centésimas de milímetros. Mientras que el segundo, se origina por un depósito de metal sobre una superficie en movimiento y tiende a desaparecer al cepillar la superficie de los rodillos o cilindros. Se presenta con mayor frecuencia cuando se lamina material que previamente ha sido recocido.

Todas las propiedades del material que dependen de la estructura reticular se ven afectadas por la deformación plástica o por el trabajo en frío. La resistencia a la tensión, a la cedencia o fluencia y la dureza, aumentan, mientras

que la ductilidad, representada por el porcentaje de alargamiento, disminuye. [11]

La distorsión de la estructura reticular impide el flujo de electrones y disminuye la conductividad eléctrica. Como se puede observar en la Fig. 2, este efecto es leve en metales puros, pero apreciable en aleaciones. [11]

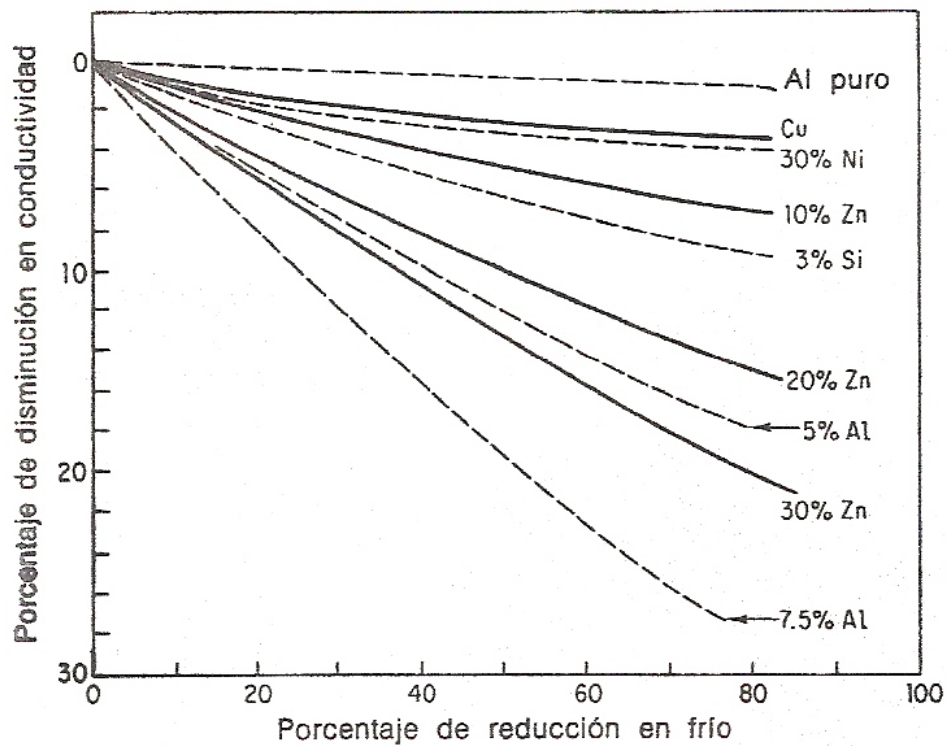
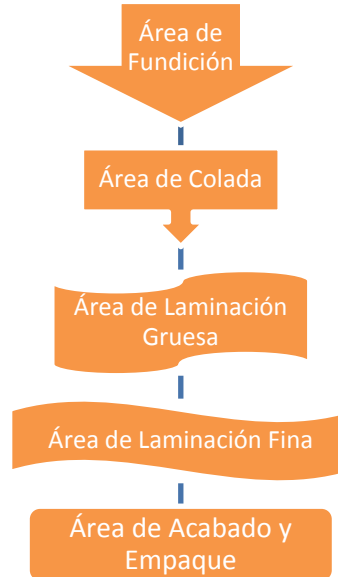


Fig. 2. Efecto en la Conductividad eléctrica materiales puros y aleaciones trabajadas en frío. [11]

### 2.3. Proceso Productivo de CVG-ALUCASA [2]

La línea de producción de esta empresa se basa 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 foil de aluminio, el cual es el producto con mayor valor agregado de la empresa, en la figura 3 se esquematizan dichas áreas.



**Fíg. 3.** Áreas de la línea de producción de Foil Domestico de C.V.G. ALUCASA.

### **2.3.1. Área de Fundición**

En esta área se realiza la fusión de la materia prima por medio de hornos, la fusión es el proceso físico en el cual la materia pasa de estado sólido a estado líquido por medio de la adición de calor. Este proceso se realiza con la finalidad de obtener un metal con una composición específica. La materia prima utilizada se encuentra en formas de lingotes o pailas, estas contienen aluminio primario de alta pureza (superior a 99,5%), material reciclable y los elementos aleantes (hierro y silicio).



**Fig. 4** Horno de fundición [2]

### **2.3.2. 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 1.5.

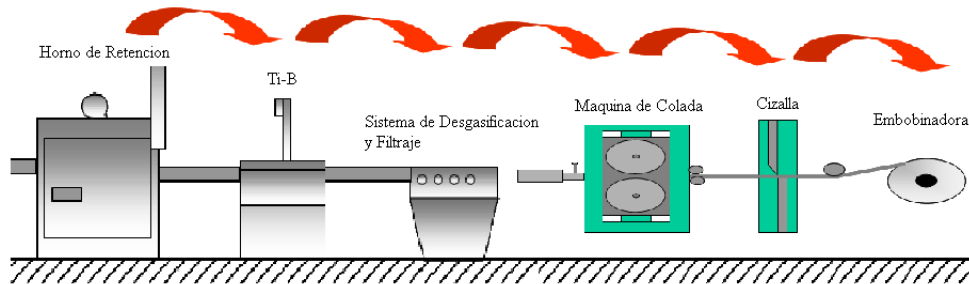


Fig. 5. Máquinas del área de colada.[2]

### 2.3.2.1. Horno de Retención

Con este horno se perfecciona el tratamiento del metal y se alcanza la temperatura de colada, aproximadamente  $820^{\circ}\text{C}$ , este gracias a una serie de quemadores y un sistema de regulación de temperatura.

El horno de fusión y el de retención se encuentran conectados por un canal con una capa de acero por el cual se transfiere metal periódicamente, además presenta un hueco de drenaje para eventual vaciado del horno.

Al material que sale del horno se le añade sales fluoruro de potasio, las cuales se descomponen para formar Titanio y Boro elementales, los cuales reaccionan con el aluminio y uno con otro, esto se hace con la finalidad de reducir el tamaño de grano para mejorar las propiedades mecánicas de las fundiciones metálicas.

La nucleación para la solidificación para este caso es heterogénea. Consiguientemente, el sobreenfriamiento, incrementa por la eliminación de



partículas por medios tales como la purificación o subdivisión. De tal manera, que la adición de sitios de nucleación heterogéneos convenientes incrementa la nucleación y promueve la estructura de grano de fino. El fenómeno de subenfriamiento, se basa en el enfriamiento del líquido, una cantidad muy pequeña de temperatura, por debajo de las condiciones de solidificación, pero sin que ocurra la solidificación.

#### **2.3.2.2. 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 como el argón mezclado con cloro, con el la inyección de argón por medio de rotores se busca eliminar el hidrogeno presente en el metal, este elemento puede ocupar un espacio determinado en el baño de colada desplazando material durante la solidificación, siendo capaz de crear pequeños espacios libres en la chapa lo cual afectaría la calidad del foil de aluminio.

El argón en formas de burbujas dentro del material fundido crea zonas de baja concentración de hidrogeno, como todo el sistema tiende al equilibrio, el hidrogeno trata de ocupar estas zonas y queda atrapado dentro de estas burbujas las cuales ascienden sacando el Hidrogeno fuera del baño de colada, además con el efecto mecánico del rotor se eliminan del baño de colada pequeños sólidos presentes en el mismo.

El cloro cumple con la función de atraer los elementos alcalinos presentes en el material fundido, como el sodio, el potasio y el litio, estos de igual manera pueden generar defectos al solidificarse, debido a que, al tener

propiedades mecánicas distintas, no se deforman junto con el resto del metal, lo cual pudiera crear estructuras que afectaría el producto final. El dispositivo que realiza este proceso se denomina SNIF T25, está conformado por una caja metálica recubierta de un material refractario en su interior, este mantiene la temperatura del metal gracias a un sistema de calentamiento dotado con sistema de regulación. La mezcla gaseosa utilizada es inyectada por un difusor de granito, accionado por un motor eléctrico, permitiendo la distribución uniforme en todo el metal

Para eliminar aquellos sólidos que no pudieron extraerse con el sistema de desgasificación, se utilizan un sistema de filtro dobles de 50 y 30 poros por pulgadas, estos están constituidos de una membrana de cerámica porosa contenida en una caja metálica, revestida en su interior de refractario, el filtro puede estar dotado por un sistema “bypass” para efectuar la sustitución de la placa porosa sin interrumpir la colada.

### **2.3.2.3. Máquina de Colada**

El procedimiento que se realiza en esta etapa es el vaciado continuo de laminas de rollo pero se conoce también como “caster”, este se basa en la colocación de una pieza cerámica denominada boquilla, con la finalidad de alinear el metal líquido entre los dos rodillos de colada envueltos en una camisa de acero y montados sobre bloques con rodamientos antifricción, los cuales están enfriados internamente con agua. a pasar el metal por la línea de rodillos se lleva a cabo la solidificación. La boquilla se encuentra envuelta en grafito para que el aluminio no se adhiera a dicha camisa durante la solidificación.

Los parámetros del proceso son la velocidad de banda que se encuentra entre 1.0 y 1.3 m/min., la temperatura del baño en caja de colada es de  $705 \pm 5^\circ\text{C}$ , el agua de enfriamiento para la condición de entrada 1,3 y 4 se encuentra entre  $35$  y  $50^\circ\text{C}$  y la de la colada 2 se encuentra entre  $50$  y  $70^\circ\text{C}$ , al finalizar este proceso la temperatura sube a  $10^\circ\text{C}$  como máximo. Para finalizar se obtiene una composición química del rollo de: Silicio (Si) 0.55 a 0.65%, Hierro (Fe) 0.8 a 0.9% y Titanio (Ti) 0.020 a 0.028%.

### **Cizalla y Embobinadora**

Una vez formada la lámina, ésta pasa por unos rodillos pinzadores que cumplen la función de guiarla y además generan una tensión leve en la misma, sobre todo en los inicios de la bobina. Luego pasa por la cizalla de accionamiento hidráulico, aquí se efectúan los cortes necesarios tanto de puntas y colas o terminaciones de bobinas, además de muestras para inspección.

Por último, en el embobinador, accionado por un sistema motor-reductor, con regulación de velocidad y tensión, se enrolla la lámina tomando en cuenta el peso, el diámetro interno y el diámetro externo para definir la terminación de la bobina, esta bobina presenta un espesor aproximado de 6 mm y para finalizar se deja enfriar a temperatura ambiente por 48 horas. Es importante mencionar que el proceso descrito desde el horno de fusión hasta el embobinador se conoce como “Colada Continua de Doble Rodillo”.

### 2.3.3. Área de Laminación Gruesa

La laminación es un proceso en el cual una lámina de aluminio se hace pasar a través de 2 cilindros, que giran aplicando una carga hasta llegar al espesor deseado, este se obtiene realizando una serie de pases en los laminadores, cada pase de aproximadamente 50% de reducción en el espesor en CVG-Alucasa todos los laminadores son del tipo “Laminador Cuarto”; estos laminadores usan como lubricante base parafina. Este lubricante tiene la función de refrigerar ya que disipa el calor que se genera por el roce en la zona de trabajo, también cumple con la función de lubricar ya que soporta la presión de mordida entre los rodillos y el metal, por esta razón se encuentra presente durante todo el proceso productivo donde el material tiene contacto con los rodillos. En la figura se puede observar un ejemplo de las maquinas que se encuentran en esta área.

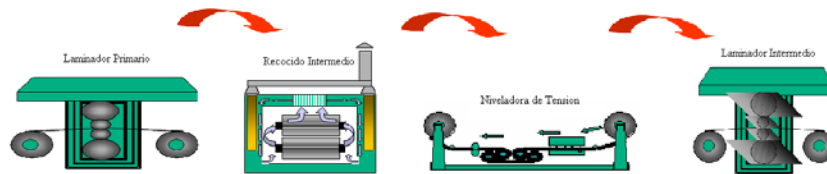


Fig. 6 Máquinas del área de laminación gruesa. [2]

#### 2.3.3.1. Laminador Primario

En esta etapa se realizan 4 pases principales de reducción sin recocido intermedio y se reduce el material de 6 a 0.27 mm., se utilizan laminadores marca Hunter, cuya velocidad máxima es de 457 m/min., peso máximo de 10TM, ancho de entrada entre 1016 y 1600 mm, ancho de salida 914 y 1600

mm, y ancho máximo de corte por lado de 50 mm, a continuación se presenta los datos de los distintos pases.

**Tabla 2.** Pases del laminador primario. [2]

Pase N°.	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

### 2.3.3.2. Recocido Intermedio

La empresa CVG-Alucasa usa hornos de atmosfera, específicamente de resistencia eléctrica o por combustible, estos son ventajosos para realizar tratamientos térmicos a temperaturas entre 100 y 200 °C y para temperaturas superiores a los 500 °C, además son adecuados para tratamientos de piezas con formas complicadas y piezas de fundición.

Dentro del horno las piezas deben estar situadas a con suficiente espaciamiento unas de otras y sobre todo separadas de las paredes del horno. Es importante calentar rápidamente la pieza a recocer, ya que con una baja velocidad de calentamiento se favorece un tamaño de grano grande y a la ocurrencia de la precipitación de fase secundaria, además la carga del horno debe realizarse en caliente y a una temperatura superior a la de recocido disminuyendo posteriormente el regulador del horno a la temperatura correspondiente al tipo de aleación. Una buena circulación de aire favorece a la

uniformidad de la temperatura y a un rápido calentamiento. A continuación se presentan los parámetros de los hornos de recocido.

**Tabla 3.** Parámetros de uso de los hornos de recocido intermedio. [2]

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)

En esta área se utilizan 3 hornos de recocido marca GUINEA, denominados con los códigos técnicos 241, 242 y 243. Cada uno admite rollos con un espesor de banda entre 0,016 y 7 mm, con un diámetro exterior comprendido entre 610 y 1830 mm y un ancho desde 800 hasta 1600 mm. La capacidad de carga del horno 241 está entre 20 y 30 TM y los hornos 242 y 243 son de 30 a 40 TM.

### **Niveladora de Tensión**

Esta máquina está ubicada a la salida de los hornos de recocido, esta tiene la función en todo el material de la lamina una densidad de tensiones lo más homogénea posible. Durante el proceso se realiza la reducción del ancho de la lamina desde 1320 a 1284 mm a una velocidad de 150 m/min, conservándose el espesor inicial de aproximadamente 0.58mm.

La niveladora utilizada es marca HUNTER, cuyo espesor mínimo por lámina es de 0,25 mm, el peso máximo del rollo es de 10.000 Kg., y el corte del borde máximo por lado es de 60 mm y el mínimo es de 20 mm. Una vez terminada esta operación, se procedía a deformar las chapas mediante laminadores intermedios.

### 2.3.3.3. Laminador Intermedio

Una vez asegurado una condición de tensión de la lámina considerablemente homogénea, se continúa con el laminado. Los parámetros de los respectivos pasos del laminador intermedio se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4.** Pases del laminador intermedio. [2]

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

La marca de este laminador es COSIN, posee un valor de velocidad máxima de 1.000 m/min, con un ancho máximo de entrada y salida de banda de 1.524 mm y un mínimo de entrada y salida de banda de 900 mm. Con respecto a los valores de espesor, el máximo y mínimo de entrada son de 1,5 y 0,03 mm respectivamente, mientras que el mínimo de salida es de 0,02 mm.

## 24. Metalurgia física. [19]

La metalurgia física se relaciona con el efecto del arreglo atómico, la microestructura del metal y con sus propiedades físicas. Se pueden resumir estas relaciones en la siguiente tabla.

**Tabla 5.** Propiedades físicas, influencia del arreglo y de los defectos atómicos y influencia de la microestructura. [19]

Propiedades físicas		Influencia del arreglo y de los defectos atómicos	Influencia de la microestructura
Mecánica	Resistencia	muy fuerte	muy fuerte
	Ductilidad		
Eléctrica y térmica	resistividad	poca	de ligera- fuerte
	Magnetización		
	Conductividad		
Química	resistencia a la corrosión	poca	ligera- moderada
	potencial catalítico		

Como puede observarse en la tabla, si se controla el arreglo atómico y la microestructura se pueden controlar todas las propiedades físicas del metal, pero particularmente las propiedades mecánicas. Se puede controlar el arreglo atómico y la microestructura por medio de procesos tales como colado, conformado y tratamiento térmico.



### 2.4.1. Descripción de los cristales

La mayoría de los materiales sólidos no metálicos con los cuales se está en contacto a diario, se puede observar que no hay una diferencia característica entre sus forma externas. Los metales tienen una estructura cristalina, mientras materiales como madera, plásticos, papel, vidrio y otros no la tienen. En vista de que la estructura cristalina de los metales ejerce una influencia muy fuerte sobre sus propiedades, es indispensable comprender bien alguno de los conceptos elementales de los cristales.

Decir que los metales son cristales significa que sus átomos están acomodados en una disposición geométrica repetida periódicamente. Las estructuras cristalinas se describen por referencia a sus retículas de Bravais. Los metales tienen estructuras particularmente sencillas. De las 14 retículas de Bravais, todos los metales, excepto cuatro, se forman en una de las muy sencillas estructuras siguientes:

- 1) Cúbica centrada en las caras ( $ccc_a$ )
- 2) Cúbica centrada en el cuerpo ( $ccc_y$ )
- 3) Empaquetamiento hexagonal compacto.(ehc)
- 4) Tetragonal.

Muchos metales existen en más de una estructura cristalina (policristalino) dependiendo de la temperatura, pero en la mayoría de los casos, las transiciones están entre estas cuatro estructuras cristalinas.

#### **2.4.1.1. Empaquetamiento atómico de los cristales**

La estructura atómica de los cristales metálicos se describe refiriendo la disposición atómica a una red espacial. Se puede describir también la estructura atómica de los cristales desde un enfoque diferente, el cual es bastante útil para las estructuras cristalinas sencillas, tales como las que poseen los metales. Considérense los átomos de los cristales como esferas del mismo tamaño. Considerar los átomos como esferas es, desde luego, una aproximación, pero una aproximación de primer orden que en algunos casos es bastante útil.

Los enlaces metálicos que mantienen unidos a los átomos del metal tienen muy poca orientación preferencial. Desde luego, se podría esperar que esta fuerza atractiva que hala a los átomos entre sí, haga que se empaquen igualmente en todas direcciones, a fin de dejar la cantidad mínima de espacio vacío entre ellos. La estructura resultante se llama "estructura de empaquetamiento compacto".

#### **2.4.2. Estructura cristalina**

**Microestructura.** Cuando se examina un metal a escala microscópica con un microscopio óptico después de pulir y atacar con ácido en forma conveniente la superficie, se observa una amplia variedad de estructuras dependiendo de la composición y preparación de la aleación. La microestructura de la aleación se describe identificando los tipos de fases presentes y describiendo sus distribuciones de forma y tamaño. La herramienta metalúrgica más útil en la caracterización de microestructuras es el microscopio óptico. En años recientes se han desarrollado otros dos microscopios muy útiles, el microscopio

electrónico de transmisión (MET) y el microscopio electrónico de barrido (MEB). Estos microscopios dan al metalurgista un medio de caracterizar microestructuras en detalles mucho más finos que lo que es posible con el microscopio óptico.

Las superficies de especímenes metálicos atacadas por ácido pueden examinarse fácilmente en el MEB a aumentos desde 10 hasta 40,000 X. Sin embargo, ya que la mayor parte de las muestras metalúrgicas son relativamente planas, el MEB no aventaja al microscopio óptico en tales muestras, excepto en aumentos de alrededor de 400 X y mayores. Actualmente, los mejores MEB de investigación que operan en laboratorios son por lo general capaces de resolver distancias mínimas de 10 nm.

**Tabla 6.** Poder de resolución de los microscopios de mayor uso en metalurgia. [19]

<b>Microscopio</b>	<b>Distancia mínima de resolución en la práctica</b>	<b>Aumento máximo, arriba del cual no se define ningún detalle adicional</b>
Óptico	0.2 $\mu\text{m}$ (200 nm)	1,000 X
MEB	100 $\text{Å}$ (10 nm)	20,000 X
MET	10 $\text{Å}$ (1 nm)	200,000 X

**Arreglo atómico.** La orientación cristalográfica de tales microconstituyentes tiene a menudo una fuerte influencia sobre las propiedades físicas de la aleación. Además, la presencia y extensión de defectos en los cristales individuales que son metálicos juegan un papel importante en el control de las propiedades físicas. La herramienta metalúrgica más útil para determinar orientaciones cristalográficas y la naturaleza y extensión de la imperfección cristalina ha sido la difracción de rayos X. Sin embargo, con el advenimiento de

las microscopía MÉT y MEB, la difracción de electrones directamente dentro del microscopio se ha convertido en una herramienta muy poderosa para estos propósitos.

### **2.4.3. Deformación plástica**

El principal mecanismo en la deformación de materiales cristalinos, es el deslizamiento, este mecanismo consiste en un desplazamiento de planos uno sobre el otro, por medio de movimientos de dislocaciones en ciertos planos y a lo largo de ciertas direcciones cristalográficas. [12]

Cuando un material policristalino está sujeto a esfuerzos, el deslizamiento empieza en aquellos granos en que el sistema de deslizamiento se halla mas favorablemente situado respecto al esfuerzo aplicado. Conforme avanza la deformación y la rotación, cada grano tiende a alargarse en la dirección de flujo. Después de cierta cantidad de deformación, la mayoría de los granos tendrán un plano cristalino en particular en la dirección de deformación. El material ahora presenta una orientación preferente, lo que resulta en propiedades un poco distintas, dependiendo de la dirección de medición. [11]

A bajas temperaturas un aumento en la deformación produce nuevas líneas de deslizamiento y no una continuación del proceso sobre las ya existentes; esto indica que el plano aumentó su resistencia a la deformación como resultado del proceso de deslizamiento. [12]

Cuando un cristal se deforma, hay alguna distorsión de la estructura reticular. La deformación es mayor sobre los planos de deslizamiento y

fronteras de grano y aumentan a mayor deformación; entonces el material sufre endurecimiento por deformación. Independientemente de la deformación de la estructura reticular, el apilamiento de dislocaciones contra obstáculos (como fronteras de granos y átomos extraños) y la trabazón de dislocaciones en los planos de deslizamiento que se cortan, incrementan la resistencia ulterior a la deformación. En nuestro caso el endurecimiento producido por laminado, los obstáculos son paradójicamente las propias dislocaciones. [11]

Ya se mencionó que de todas las propiedades físicas de los metales, la resistencia y ductilidad son las propiedades más fuertemente controladas por la estructura atómica y la microestructura del metal. Se considerará la deformación de monocristales, primero desde el punto de vista macroscópico o fenomenológico, y luego desde el punto de vista atómico.

Las propiedades mecánicas de un metal pueden representarse por un diagrama esfuerzo-deformación, el cual, para los metales policristalinos, se asemeja a menudo al de la figura 7.1a. Si el esfuerzo aplicado es menor que el límite elástico (el cual se mide estrechamente por el esfuerzo a la cedencia), se dice que la deformación es elástica. A niveles de esfuerzos iguales o mayores que el esfuerzo de cedencia, el metal se deforma plásticamente, y a cualquier nivel de esfuerzos arriba del esfuerzo de cedencia se le llama esfuerzo de flujo.

#### **2.4.3.1. Deformación elástica en la laminación**

En la laminación, las herramientas se deforman elásticamente en una extensión mayor, debido a sus dimensiones relativamente grandes, y también debido a la elasticidad en los castilletes grandes. Es esencial tomar esto en

cuenta, en la deformación de los cilindros y en el cálculo de las cargas de los mismos. [9]

Existen otras consecuencias de la deformación elástica que, con frecuencia, pueden ser de mayor importancia en la laminación que este incremento de la carga.

La tensión de fluencia relativa (dureza) de los cilindros y de la banda es importante, pero no muestran por qué el comportamiento debe estar relacionado con el espesor. Si la interface fuese perfectamente sin rozamiento, sería teóricamente posible laminar una banda hasta un espesor infinitamente delgado. Sin embargo, el rozamiento provoca un incremento de la tensión longitudinal, que a su vez incrementa la presión de los cilindros – el pico de rozamiento. Si el radio de los cilindros y la reducción de sección se mantiene constante, entonces la tensión de rozamiento también permanece constante, pero el área de la sección transversal de la banda decrece a medida que disminuye el espesor en el espacio entre los cilindros. Esto acarrea un incremento en la tensión longitudinal y el aumento en la presión de los cilindros, a medida que el espesor de la banda disminuye. Así, una reducción de sección dada requiere una carga mayor a medida que se reduce el espesor, lo que equivale a intentar deformar un metal de mayor dureza. Cuando se alcanza un espesor determinado, los cilindros se deforman con más facilidad que la banda.

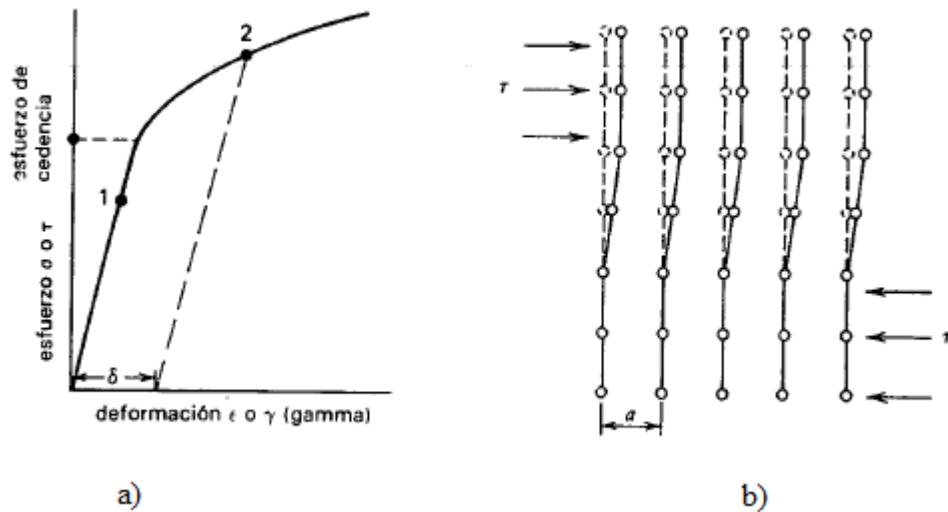
En consecuencia, para obtener el menor espesor posible de la banda, el metal debe estar recocido y el coeficiente de rozamiento debe ser tan bajo como sea posible. [9]

El coeficiente de endurecimiento no siempre es conveniente reducirlo a un mínimo, pero aun en estos casos se debe evitar que el material se adhiera a la herramienta. Como se explico anteriormente, el mejor agarre de los cilindros mediante un rozamiento mayor permite reducción de espesores mayores. [9]

La hipótesis de un material rígido-plástico está lejos de ser válida para estas condiciones de trabajo, que pueden estar dominadas por la deformación elástica de la banda a la entrada y la salida. Estas regiones, en contacto con los cilindros, aumentan el pico de rozamiento. Se establece una compresión longitudinal adicional, que es equivalente a una tracción hacia adelante negativa, incrementando de nuevo la carga. [9]

La distinción entre deformación elástica y plástica puede definirse entonces formalmente como sigue.

- 1) Deformación elástica: deformación recuperable completamente al eliminar el esfuerzo.
- 2) Deformación plástica: deformación no recuperable al eliminarse el esfuerzo.



**Fig. 7.** a) Diagrama de esfuerzo- deformación. b) Desplazamiento atómico producido por un esfuerzo cortante  $\tau$ . [19]

Si se aplica un esfuerzo a un metal en el punto 1 de la figura 7.1a y luego se elimina dicho esfuerzo, el metal volverá esencialmente a su forma original. Sin embargo, si se fuera a eliminar el esfuerzo en el nivel mostrado por el punto 2, el metal retendría un alargamiento permanente mostrado como  $\delta$  en la figura 7.1a. Es importante comprender la diferencia entre estos dos modos de deformación a escala atómica. Si se aplica un esfuerzo de corte a un cristal, los átomos se desplazarán de sus posiciones de equilibrio (sus sitios reticulares normales) como se muestra en la figura 7.1b. Si el esfuerzo de corte es pequeño, los átomos no se desplazarán muy lejos de sus posiciones de equilibrio, y al eliminar el esfuerzo los enlaces entre los átomos los hace regresar a sus sitios reticulares originales. Así se tiene deformación elástica sin desplazamiento atómico permanente. [19]

Supóngase, sin embargo, que el esfuerzo de corte fuese lo bastante grande como para causar que la región superior de átomos se desplazara a una



distancia  $a$ . Estos átomos se hallarían ahora en nuevas posiciones de equilibrio (sitios reticulares), de modo que al eliminar el esfuerzo, simplemente retendrían su desplazamiento permanente. Este desplazamiento permanente de los átomos de metal ocurre durante la deformación plástica por cuatro mecanismos principales:

1. deslizamiento
2. maclado
3. deslizamiento en los límites de grano
4. termofluencia difusional.

El mecanismo 1 es el modo de deformación más importante. El mecanismo 2 generalmente opera a bajas temperaturas y es significativo a bajas temperaturas en metales etc. Los mecanismos 3 y 4 se vuelven significativos a altas temperaturas. [19]

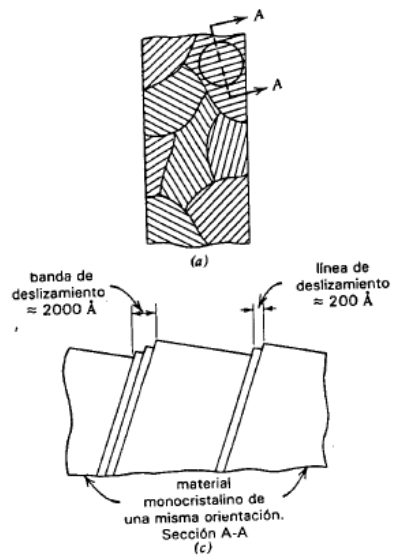
#### **2.4.3.2. Sistemas de deslizamiento [19]**

El mecanismo de deslizamiento puede definirse formalmente como sigue: el movimiento paralelo de dos regiones cristalinas adyacentes, una respecto a la otra, a través de algún plano (o planos), es decir la combinación de un plano y una dirección que se halla sobre el plano a lo largo del cual se produce el deslizamiento.

Si se electropule un trozo liso de lámina de aluminio, su superficie tendrá la apariencia de un espejo de buena calidad. El doblar la tira de aluminio hasta un ángulo de  $10^\circ$  a  $30^\circ$  hace que aparezca la estructura de grano real de la tira de aluminio a la vista, y si el tamaño de grano es lo bastante grande

aparecerá una estructura como la de la figura 8a. Al examinar al microscopio a una ampliación de alrededor de 100 X, se aprecian muchas líneas paralelas dentro de cada grano; ver la figura 9. Estas familias de líneas paralelas en cada grano, en realidad son liberadas en la superficie debido a deslizamiento provocado por la deformación plástica producida por el dobles. En la figura 8c puede verse que la deformación de cada grano se lleva a cabo por deslizamiento de pequeños bloques del cristal, uno con respecto a otro, a lo largo de familias de planos paralelos. El deslizamiento no se produce sobre un plano solamente, sino sobre pequeñas regiones de planos paralelos llamados bandas de deslizamiento o líneas de deslizamiento, dependiendo de sus espesores (véase la figura 8c). Puesto que todas las líneas de deslizamiento están en grupos paralelos dentro de cada monocristal (cada grano), deben corresponder á la misma familia de planos  $(hkl)$  ocupados del grano particular. A partir de mediciones sobre especímenes de monocristales de orientaciones conocidas se pueden determinar 1) los planos sobre los cuales se produce deslizamiento y 2) la dirección de deslizamiento dentro de estos planos. Tales experimentos han revelado el hecho muy fascinante de que el deslizamiento en los cristales  $ccc_a$  siempre se produce sobre los planos  $\{111\}$  pero solamente en las direcciones  $(110)$ . Esto significa que si se produce el deslizamiento sobre un plano  $(111)$  será en alguna de las tres direcciones  $\pm[101]$ ,  $\pm[110]$ ,  $\pm[011]$ ; véase la figura 8a.

[19]



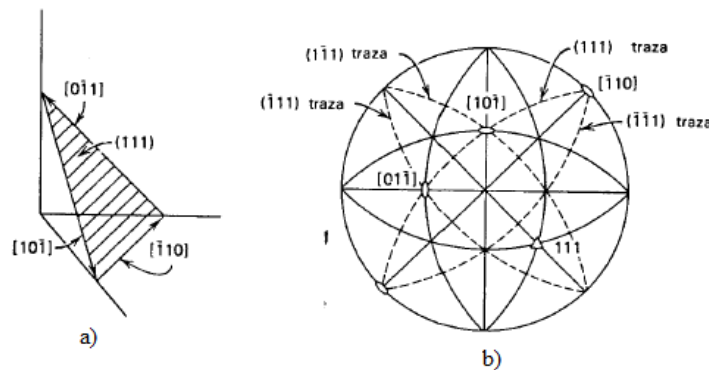
**Fig. 8.** a) Macrovista de estructuras de grano revelada por la línea de deslizamiento. c) Intersección de líneas de deslizamiento en la superficie de una tira Al. [19]



**Fig. 9** Micrografía a 100X mostrando líneas de deslizamiento y límites de grano en Al. [19]

La figura 10a muestra tres sistemas de deslizamiento para los cristales  $ccc_a$ ,  $(111)[\bar{1}10]$ ,  $(111)[10\bar{1}]$  y  $(\bar{1}11)[0\bar{1}1]$ . Los sistemas de deslizamiento pueden determinarse muy fácilmente a partir de una proyección estereográfica. La

figura 10b muestra la traza del plano (111) y se ve que sobre esta traza están tres direcciones (110) y, desde luego, representan direcciones que yacen sobre este plano. Los cristales  $ccc_a$  tienen 12 sistemas de deslizamiento debido a que tienen cuatro grupos  $\{111\}$  con tres direcciones  $\langle 110 \rangle$  en cada una. Los 12 sistemas de deslizamiento pueden identificarse rápidamente en la figura 10b. El examen del grano del lado derecho de la figura 10b revela que ha ocurrido deslizamiento en tres de los cuatro posibles grupos  $\{111\}$ , mientras que en el grano del lado izquierdo el deslizamiento ha sido predominantemente en solo un grupo de planos  $\{111\}$ . Es interesante notar que ha ocurrido deslizamiento a través del límite entre el grano del lado izquierdo y el superior, indicando así que el ángulo de disconformidad en la orientación a través del límite es bastante pequeño.



**Fig. 10.** Sistemas de deslizamiento en cristales  $ccc_a$ . [19]

Tres observaciones generales son de gran valor:

1. Las direcciones de deslizamiento siempre son en la dirección de empacamiento compacto. Existen aparentemente algunas excepciones, por ejemplo, mercurio sólido.

2. El deslizamiento ocurre *usualmente* sobre la mayoría de los planos compactos. Esta observación parece estar relacionada con el hecho de que los planos empaquetados más densamente también son el grupo de planos (*hkt*) ocupados que tienen el espaciamiento más amplio
3. El deslizamiento se produce primero sobre el sistema de deslizamiento que tiene el mayor esfuerzo de corte a lo largo de su dirección de deslizamiento.

**Tabla 7.** Muestras de algunas texturas de conformado en frío. [19]

<b>Estructura Cristalina</b>	<b>Modo de conformado</b>		<b>Textura</b>
ccc <sub>a</sub>	Estirado y extrusión del alambre	<111 > <100>	Paralelo al eje del alambre
CCCu	Estirado y extrusión del alambre	110	Paralelo al eje del alambre
ehc	Estirado y extrusión del alambre	<1010>	Paralelo al eje del alambre
ccc <sub>a</sub>	Laminado	{110}	Paralelo al plano de laminado
		<112>	
ccc <sub>u</sub>	Laminado	{001}	Paralelo al plano de laminado
		<110>	Paralelo a la dirección de laminado
ehe	Laminado	{0001}	Paralelo al plano de laminado
		<1120>	Paralelo a la dirección de laminado

#### 2.4.4. Dislocaciones

Las dislocaciones son otro tipo de defecto en cristales. Las dislocaciones son áreas en las que los átomos están fuera de posición en la estructura cristalina.

Hay dos tipos básicos de dislocaciones, de la dislocación de borde y de la dislocación de tornillo. Realmente, las dislocaciones del borde y de tornillo son apenas formas extremas de las estructuras posibles de la dislocación que pueden ocurrir.

#### 2.4.4.1. Dislocación de borde

Estas dislocaciones pueden visualizarse muy fácilmente como un medio plano extra de átomos en una retícula. Esto se muestra en dos dimensiones en la figura 11a y en tres dimensiones en la figura 11b. A la dislocación se llama defecto lineal debido a que la localización de los puntos defectuosos producidos en la retícula por la dislocación se halla a lo largo de una línea. Esta línea corre a lo largo de la parte baja del medio plano extra mostrado en la figura 11b.

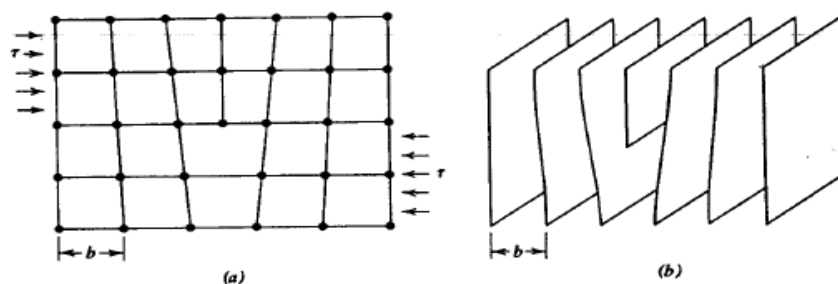


Fig. 11. La dislocación de borde. a) Dos dimensiones, b) Tres dimensiones. [19]

**Línea de dislocación:** la línea que va a lo largo de aquel borde del plano extra de átomos que termina dentro del cristal.

**Plano de deslizamiento:** el plano definido por la línea de dislocación y el vector de deslizamiento. Si la dislocación se mueve en la dirección del vector

de deslizamiento, se dice que se mueve propiamente por deslizamiento, y la línea de dislocación se mueve a lo largo del plano de deslizamiento.

#### 2.4.4.2. Dislocación de Tornillo

Supóngase que se tomase una placa y se le aplicase un esfuerzo cortante en el extremo como se muestra en la figura 12a. Este esfuerzo cortante podría hacer que la placa se desgarrase en forma muy parecida a como se rompe un pedazo de papel a la mitad, según se ve en la figura 12b

El desplazamiento mostrado en la figura 12b es una representación de la geometría de una dislocación de tornillo. Nótese que la mitad superior del bloque se mueve (se disloca) con respecto a la mitad inferior por un *vector de deslizamiento* fijo a través de algún *plano de deslizamiento*. La línea de la dislocación de tornillo se sitúa en el borde principal de la alteración del bloque y es paralela al vector de deslizamiento.

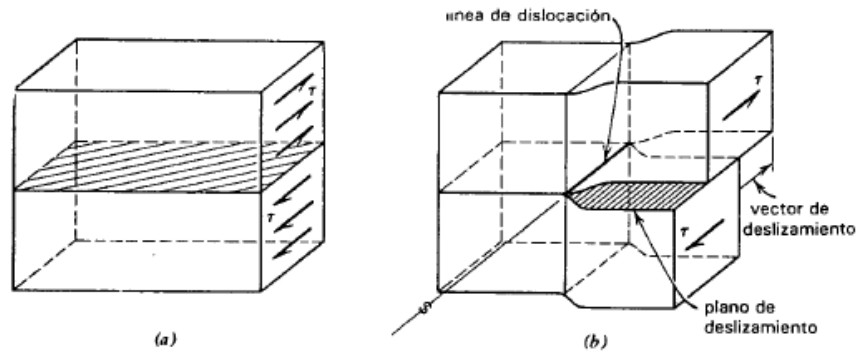


Fig. 12. Dislocación de tornillo. [19]

#### **2.4.5. 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 [6].

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.

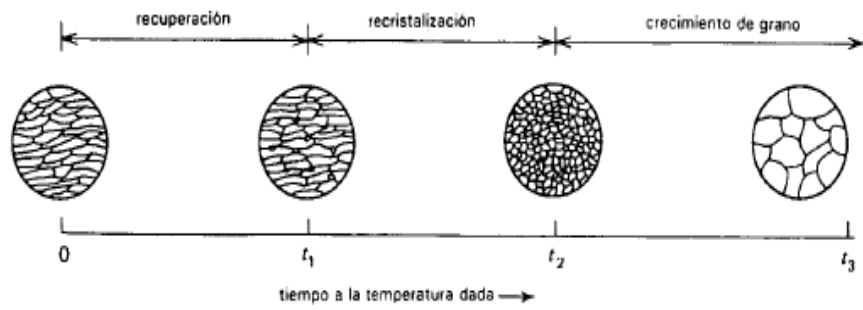
La dureza disminuye con el recocido, recuperando en cierta medida su ductilidad. Regularmente sólo hay un pequeño cambio en la dureza del material durante el proceso de recuperación; este corresponde, aproximadamente, a sólo un quinto del total. Esto se debe a que la dureza disminuye al disminuir la



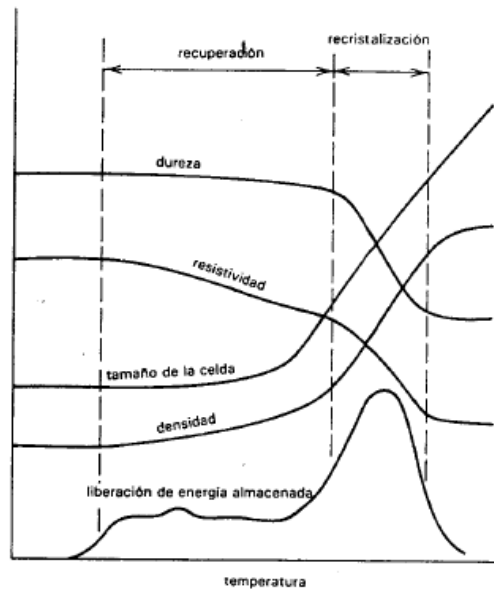
densidad de las dislocaciones. Durante el proceso de recristalización ocurre un fenómeno similar; pero mientras que en la recuperación se da una pequeña caída de la densidad de dislocaciones, durante la recristalización hay una gran caída de estas; Esto ha de esperarse, ya que los nuevos granos recristalizados 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.



**Fig. 13.** Representación esquemática del recocido [19]



**Fig. 14.** Variación de algunas propiedades físicas durante el recocido. [19]

#### **2.4.5.1. Recuperación**

Es un proceso a baja temperatura, y los cambios producidos en las propiedades no dan lugar a un cambio apreciable en la microestructura.

Cuando se suprime la carga que ha producido la deformación plástica en un material policristalino, no desaparece toda la deformación elástica. Esto se debe a la diferente orientación de los cristales, que no permitirán que algunos de ellos retrocedan cuando se suprime la carga. Conforme la temperatura aumenta, hay algún rápido retroceso de estos átomos desplazados elásticamente, lo cual alivia la mayor parte de la tensión interna. En algunos casos puede haber un ligera cantidad de flujo plástico, que podría causar un ligero incremento en dureza y resistencia. La conductividad eléctrica también se incrementa en forma apreciable durante la etapa de recuperación. [11]

Como las propiedades mecánicas del metal no experimentan esencialmente cambio alguno, la principal aplicación del calentamiento en la etapa de recuperación es la de aliviar tensiones internas de las aleaciones trabajadas en frío para impedir el agrietamiento por las tensiones de corrosión o para hacer mínima la distorsión producida por esfuerzos residuales. Este tratamiento en el proceso de recuperación se conoce como recocido para aliviar tensiones. [11]

Se puede pensar que existe en la superficie un espesor de la lámina que puede estar presenciando una tipo de recuperación en particular, la poligonización. Este se encuentra asociado con cristales que han sido flexionados plásticamente. Muchos investigadores han demostrado que los

puntos de Laue para cristales flexionados asumen una estructura fina después de un recocido de recuperación. [10]

#### **2.4.5.1.1. Mecanismos de recuperación.**

Los mecanismos que operan a temperaturas relativamente bajas implican movilización de vacancias; las que operan a temperaturas medias implican movilizaciones de dislocaciones sin trepado; y aquellos mecanismos a temperaturas altas implican movilización de dislocaciones con trepado, con lo que se puede apreciar la energía de activación térmica que se requiere para cada mecanismo en particular. [19]

Los subgranos se originan cuando, después de la deformación, los laberintos de dislocaciones aíslan regiones de la celda con densidad de dislocaciones relativamente bajas; estas celdas se encuentran desalineadas entre sí. Con el recocido, los laberintos de dislocaciones se condensan, disminuyendo la densidad de estas dentro de las celdas. Cerca del final de esta etapa, los granos empiezan a crecer, en otras palabras, durante la deformación plástica de metales metaestables se forman estructuras de dislocación con límites, que separan regiones casi libres de dislocaciones. Estos últimos se denominan, ya sea celdas de dislocaciones o subgranos dependiendo de su morfología y de su diferencia de orientación mutua. [13].

Otro de los mecanismos de recuperación es la coalescencia de subgranos, este se da cuando los límites entre los subgranos desaparecen durante la recuperación, eliminándose la diferencia en la orientación entre dos subgranos adyacentes; lo cual probablemente es debido a movimientos de

dislocaciones en la intercara, dándose el trepado de las mismas, para ello es necesario la difusión. [19]

Por último, el mecanismo más destacado de la recuperación es la poligonización, el cual frecuentemente es un cambio estructural que precede a la recristalización, la energía interna del metal recuperado es menor que la del estado trabajado en frío, puesto que se aniquilan más dislocaciones o se transforman en configuraciones de menor energía mediante el proceso de recuperación. Específicamente ocurre cuando un mono cristal se dobla ligeramente y luego se recoce, se fragmenta en pequeños bloques monocristalinos. El registro de Laue de un cristal, muestra una mancha de los puntos de difracción debido a los planos cristalinos curvados. Con el recocido cada punto manchado, se fragmenta en una serie de puntos bien definidos pero más pequeños. Después que se dobla el monocristal se genera un exceso de dislocaciones positivas de borde, el recocido hace que estas dislocaciones de borde se alineen una con otra en límites de bajo ángulo. Este proceso ha sido verificado utilizando técnicas de ataques, para localizar los arreglos de dislocaciones durante el proceso. Para que las dislocaciones se alineen debe haber deslizamiento y trepado. De manera general, se puede decir que la poligonización requiere un exceso de dislocaciones de borde, se produce únicamente a temperatura de recuperación más altas debido a que está implicado el “trepado” de dislocaciones, y produce subgranos que son casi 10 veces más grandes que lo que se produce vía condensación de los laberintos, o grupos de dislocaciones. [19]

#### **2.4.5.2. Recristalización**

Conforme se alcanza la temperatura superior del intervalo de recuperación, parecen nuevos materiales en la microestructura, los cuales tienen la misma composición y estructura reticular que los granos reticulares no deformados y no están alargados, sino que son aproximadamente uniformes en sus dimensiones. La recristalización tiene lugar mediante una combinación de nucleación y crecimiento de estos núcleos para abarcar todo el material trabajado en frío. [11]

A mayor cantidad de deformación previa, menor la temperatura necesaria para iniciar el proceso de la recristalización, ya que habrán mayores distorsiones y más energía interna disponible. [19]

##### **2.4.5.2.1. Mecanismos de nucleación para la recristalización**

Se han observado otros mecanismos que operan en el fenómeno de nucleación de la recristalización. Como mecanismo en sí, generalmente la nucleación se da por la migración de los límites pre-existentes, inducida por deformación, crecimiento repentino de subgranos y nucleación por coalescencia, en sitios en los cuales energéticamente sean favorables estas reacciones, tales como, límites de grano, partículas de fase secundarias, zonas en el grano con alta densidad de dislocaciones, etc [14,15,16]. Otros autores también han mencionado como sitios preferenciales para la nucleación, las bandas de deformación y bandas en los límites de grano. [17]

También se ha observado que la nucleación de la recristalización, específicamente en aleaciones de aluminio, tiene lugar tanto en los límites de grano, como en el interior de los mismos y alrededor de partículas de fases secundarias, [15-19] dependiendo del grado de deformación en frío. En estas condiciones la deformación se distribuye heterogéneamente y, por lo tanto, aquellas regiones internas de los granos cercanas a los límites o a las partículas de fases secundarias, así como también los límites mismos tendrán una energía de deformación mayor, por lo cual representan sitios preferenciales para la nucleación. [14, 16, 18,19]

Un modelo que describe satisfactoriamente el mecanismo de recristalización en aleaciones de aluminio es el propuesto por Sandstron [20], el cual representa la nucleación en términos de: la formación de núcleos por medio del crecimiento de subgranos, el crecimiento de los núcleos en la zona de deformación, y el crecimiento fuera de la zona de deformación.

La formación de núcleos por medio del crecimiento de subgranos, se asume debido a que los límites de grano de alto ángulo no se forman inicialmente, ocasionando una condición más favorable para los subgranos ligeramente más grandes, haciendo que crezcan a expensas de sus vecinos. De acuerdo con Sandstron [18,20,21], este crecimiento está controlado por los radios de los subgranos tanto de tamaños mayores como los de tamaño promedio, la movilidad de las dislocaciones y la tensión de línea de dislocaciones, concluyendo que el crecimiento de un subgrano promedio disminuye a medida que aumenta el tiempo. Al mismo tiempo que el subgrano crece incrementa la desorientación en el límite, lo cual es una consecuencia de la variación de la orientación de la red desde el límite de la zona deformada hasta la superficie de la partícula. Cuando la desorientación en el límite del

núcleo comienza a ser lo suficientemente grande, se empieza a considerar un proceso importante, la cual es la migración del límite de alto ángulo.

Un núcleo que esté formado en la zona de deformación, continúa creciendo mediante procesos de alto ángulo, este fenómeno también depende de múltiples factores, como son el radio del núcleo, la movilidad del límite de grano, la densidad de dislocaciones en la zona deformada y la energía de superficie por unidad de área de los núcleos, si es así, entonces la velocidad del crecimiento inicial aumenta a causa del crecimiento de la movilidad del límite de grano, que a su vez crece por el aumento de la desorientación en el límite. Una vez que se alcanza la “meseta” de alto ángulo, la movilidad del límite de grano es aproximadamente constante y en consecuencia la velocidad de crecimiento también. En cuanto a la energía de superficie presente en esta etapa, es en general pequeña comparada con la densidad de dislocaciones en la zona deformada, por lo que este crecimiento ocurrirá hasta el consumo de la misma. [19]

El crecimiento de los núcleos fuera de la zona de deformación está controlado por un proceso similar al crecimiento en la zona deformada. La velocidad de crecimiento puede predecirse a través de los mismos factores, exceptuando la densidad de dislocaciones en la zona deformada, el cual es reemplazado por la densidad de dislocaciones en la matriz. Esta es menor que la densidad de dislocaciones en la zona deformada, por lo tanto la energía de superficie tiene gran influencia sobre la velocidad de crecimiento. Si la recuperación de las dislocaciones es controlada por el engrosamiento de la subestructura, la dependencia de la densidad en la matriz con el tiempo puede ser de comportamiento parabólico [20]. La influencia de la recuperación en la



densidad de dislocaciones en la zona deformada es pequeña, ya que la densidad de las dislocaciones en la zona de deformación es producida por un arreglo de dislocaciones “geométricamente necesarias”, este estado sugiere un estado de menor energía. [19]

Entonces se puede concluir que el crecimiento de los subgranos en la etapa de formación de núcleos por medio del crecimiento de subgranos, está representado por un comportamiento parabólico lento, en la etapa de crecimiento en la zona deformada, el mismo es considerablemente acelerado debido a los procesos de alto ángulo y en la etapa de crecimiento fuera de la zona deformada, la velocidad de la misma es considerablemente más pequeña, debido a la menor densidad de dislocaciones.

#### **2.4.5.3. Crecimiento de grano**

Los granos grandes tienen menor energía libre que los pequeños. Esto se asocia con la menor cantidad de área de frontera de grano. Conforme la temperatura aumenta, la rigidez de la red disminuye y la rapidez de crecimiento del grano es mayor.

Como el recocido comprende la nucleación rápida y el lento crecimiento darán como resultado material de grano fino, y aquellos que favorecen la nucleación lenta y el crecimiento rápido darán como resultado material de grano grueso. El grado de deformación previa es el factor más importante que determinará el tamaño final de los granos recristalizados; si se aumenta la cantidad de deformación previa, se favorecerá la nucleación y disminuirá el tamaño final del grano. [11]

## 2.5. Conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica se puede definir como la propiedad natural característica de un cuerpo que representa la facilidad con la que los electrones pueden pasar a través de él, ésta puede variar con la temperatura y se puede decir que es una de las características más importantes de los materiales, esta se designa con la letra “ $\sigma$ ” [31][32]

La ley de la cual establece que la diferencia de potencial entre dos puntos de un material es igual a la corriente que circula a través de él multiplicado por la resistencia que ofrece el material al paso de dicha corriente, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$V = I \times R \quad (1)$$

Donde:

V: Diferencia de potencial, Voltios.

I: Intensidad de corriente, Amperes.

R: Resistencia, Ohms.

El valor de la resistencia va a variar según sea la geometría de la muestra; el valor de R disminuye con el área A y aumenta con la longitud L. Como consecuencia, se define la resistividad “ $\rho$ ” como una propiedad del material independiente de la geometría. [32]

$$\rho = \frac{R \times A}{L} \quad (2)$$

Las unidades de la resistividad son  $\Omega \cdot m$ , y la conductividad es el inverso de la resistividad y sus unidades son  $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ . [32]

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

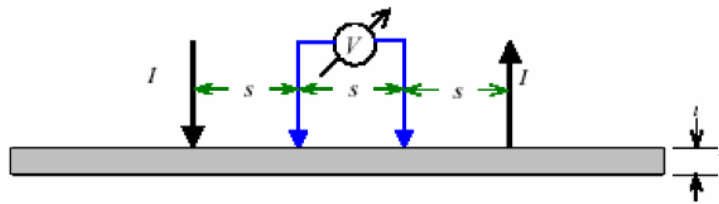
Se mide la resistividad eléctrica para medir la corriente  $I$  y la diferencia de potencial  $V$ .

Los electrones transportan la electricidad a través de un metal y admitimos que la conductividad eléctrica se debe a la circulación de los electrones a través del metal, es decir, que esta se encuentra relacionada con el número de electrones libres y con la libertad de circulación de los mismos en el metal. Todo aquello que afecte la continuidad de la materia a cualquier escala perjudica directamente la conductividad eléctrica. [31][33]

La medida de la conductividad eléctrica se ve afectada por características metalúrgicas como impurezas, elementos aleantes, la microestructura, el tamaño de grano, etc. esta se convierte un elemento que facilita el control de las siguientes características: estado de deformación, tamaño de grano, determinación de la profundidad de capas endurecidas, purezas de metales no aleados, clasificación de aleaciones. [31]

### **2.5.1. Método de las cuatro puntas**

Este método permite determinar la resistividad eléctrica de materiales metálicos conductores utilizando dos circuitos vinculados los cuales están integrados por cuatro electrodos de punta aguda que se encuentran alineados, el circuito exterior mantiene circulando una corriente fija por la muestra mientras que el circuito interior permite medir la diferencia de potencial dentro de la misma. [22][23]



**Fig. 15.** Esquema del ensayo de cuatro puntas.

Este método de prueba cubre la determinación de la resistencia eléctrica del material conductor eléctrico metálico. Prevé una exactitud de  $\pm 0.30\%$  en los especímenes de prueba que tienen una resistencia de  $0.00001 \mu\text{V}$  o más. La exactitud de la resistencia de masa se puede afectar al contrario por posibles inexactitudes en la densidad presunta del conductor. El espécimen de la prueba puede estar bajo la forma de alambre, tira, varilla, barra, tubo, o forma. [23]

Es un método rápido y sencillo para determinar la resistencia eléctrica basándose en la Ley de Ohm.

La exactitud de este método depende de la calibración y la estabilidad de los dos medidores y del efecto de carga del voltímetro. Es conveniente emplear un voltímetro digital de alta impedancia de entrada y un amperímetro digital para reducir al mínimo el error en los valores de resistencia medidos. [24]

### **Resistividad de Volumen**

Es la resistividad eléctrica de un cuerpo por unidad de longitud y unidad de área de la sección transversal, en unidades métricas se expresa como  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ . Puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$\rho_v = \left(\frac{A}{L}\right) \times R \quad (4)$$

Donde:

$\rho_v$ : Resistividad de volumen,  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .

A: Área de sección transversal,  $\text{mm}^2$ .

L: Longitud, para determinar R, en m.

R: Resistencia medida,  $\Omega$ . [23]

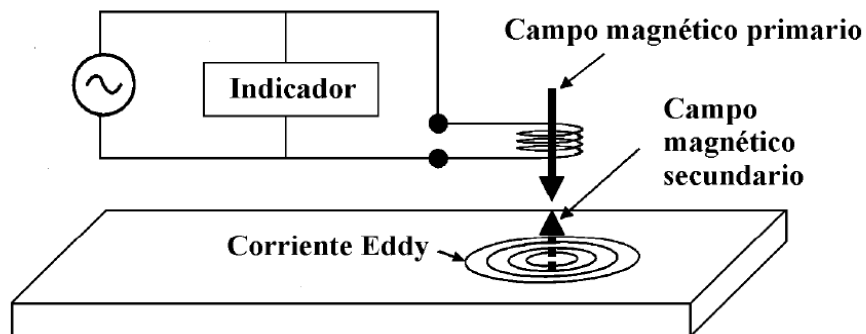
### 2.5.2. Método de Corriente Inducidas

La inspección por Corriente de Eddy se basa en los principios de inducción electromagnética y se utiliza para identificar o para distinguir entre una gran variedad de condiciones físicas, estructurales, y metalúrgicas en metales eléctricamente conductores y piezas de metal ferromagnéticos y no ferromagnéticos.

La inspección por corriente de Eddy se puede utilizar para:

1. Medir o identificar las condiciones y las características tales como conductividad eléctrica, permeabilidad magnética, tamaño de grano, la condición del tratamiento térmico, la dureza, y dimensiones físicas
2. Detectar las costuras, los regazos, las grietas, los vacíos, y las inclusiones
3. Clasificar los metales disímiles y detectar las diferencias en su composición, microestructura, y otras características.
4. Medir el grosor de una capa no conductiva en un metal conductor, o el grosor de la capa de metal no magnética en un metal magnético [27]

La pieza o componente a ser inspeccionado, se coloca dentro de una bobina, (o en contacto con ella) por la cual circula una corriente alterna (AC) que recibe el nombre de corriente de excitación. Como una consecuencia de lo anterior, se produce en las proximidades de la bobina un campo electromagnético llamado *campo primario* ( $H_p$ ) el cual produce el flujo de corrientes inducidas sobre la pieza inspeccionada. Estas corrientes inducidas a su vez producen un segundo campo electromagnético llamado *campo secundario* ( $H_s$ ) cuya principal característica es la de tener un sentido opuesto al primario (Ley de Lenz). Estos campos se combinan para producir un campo electromagnético resultante ( $H_p - H_s$ ). [31]



**Fig. 16.** Representación esquemática de la técnica de inspección por corrientes Parásitas, o Eddy. [29]

Las variaciones en las propiedades del material que está siendo ensayado, tales como composición química, dureza, espesores de recubrimientos, tratamientos térmicos, presencia de discontinuidades, variaciones de geometría y dimensiones entre otros, producen variaciones en el flujo de las corrientes inducidas, esto a su vez produce variaciones en el campo secundario ( $H_s$ ) y a través de este en el campo resultante ( $H_p - H_s$ ). Este campo

resultante actúa sobre la bobina inductora, produciendo variaciones en el voltaje alterno que se le aplica y en su impedancia eléctrica. Estas variaciones pueden ser detectadas y procesadas, para ser representadas en algún dispositivo de medición analógico o digital, tubo de rayos catódicos o un registrador gráfico. [31]

### **2.5.2.1. Parámetro que dependen de las propiedades del material**

#### **Conductividad eléctrica**

El parámetro principal que describe el fenómeno de las corrientes parásitas es la conductividad, por lo que se aplica fundamentalmente en materiales conductores, y especialmente metales. Así, mediante una IND por corrientes Eddy se pueden evaluar parámetros que dependen de la conductividad, tales como la temperatura; el tipo de aleación; el tratamiento térmico y su microestructura (tamaño de grano); la dureza; los esfuerzos residuales, y las discontinuidades. En general, a mayor conductividad, mayor sensibilidad del método con una menor capacidad de penetración superficial. [29]

#### **Permeabilidad magnética**

La permeabilidad magnética ( $\mu$ ) del material de una pieza que se inspeccione tiene un efecto muy importante en la inspección no destructiva, particularmente la que utiliza corrientes Eddy. La permeabilidad definida como la ecuación 4.1, mide la capacidad para producir un campo magnético en el material. [29]

$$\mu_r = \frac{B}{H} \quad (5)$$

Donde,

$B$  = intensidad del campo magnético

$H$  = fuerza magnetizadora aplicada al material

La permeabilidad magnética  $\mu_r=1$ , corresponde al valor de materiales no magnéticos. Para ferromagnéticos, el valor de  $\mu$  es mayor a uno,  $\mu >1$ , lo que significa que el campo magnético inducido se intensifica con el material. [29]

### **Factor de distancia (*lift-off factor*)**

Las indicaciones de las corrientes Eddy son muy sensibles a la distancia entre la bobina y la superficie del material inspeccionado, debido a que la densidad de corriente disminuye rápidamente a medida que la bobina se separa de la superficie de la pieza. Como las variaciones en la separación entre la bobina y la superficie (es decir, el acoplamiento magnético) pueden enmascarar los cambios de impedancia por las causas que interesan, es importante que la distancia se mantenga constante. A pesar que con ello se complica la aplicación de la técnica de inspección no destructiva por corrientes Eddy para piezas de geometría irregular, el efecto del factor de distancia puede emplearse para medir espesores de recubrimientos no conductores (ie pinturas, anodizados) sobre superficies metálicas. [29]

### **Factor de relleno (*fill factor*)**

El factor de relleno, o “*fill factor*”, describe en el caso de bobinas exteriores o interiores, en productos tubulares el mismo efecto que en el factor de distancia para las bobinas de superficies. Al respecto, el factor de relleno es



sensible a la distancia que hay entre la superficie del material y la de la bobina, que fundamentalmente se deben a las variaciones en el diámetro (interior o exterior, según el caso) de la pieza y del diámetro de la bobina. [29]

### **Efectos de borde o frontera**

El efecto de borde se relaciona con la distorsión en el flujo de corriente inducida, cuando la bobina se aproxima al borde de la pieza o a una unión entre materiales. Una distorsión grande en el flujo de corriente puede tener cambios importantes en las mediciones y, por tanto, enmascarar variaciones por otro tipo de anomalías. A pesar de que existen diseños de bobinas que reducen el área de inspección minimizando el efecto de borde, éste no se puede eliminar completamente, y es recomendable que el área de inspección se mantenga a una distancia determinada de los bordes o fronteras. En general, se establece 3,175 mm (1/8”) como la distancia mínima a la que se puede aproximar el área de inspección al borde; sin embargo, el valor depende del tipo y tamaño de bobina y la frecuencia de la corriente alterna de prueba.[29]

### **Efecto de pantalla (*skin factor*)**

En la figura 18 se presenta una gráfica en la que se muestra la variación de la densidad de corriente como función de la profundidad; puede observarse cómo disminuye rápidamente la densidad de corriente a medida que aumenta la profundidad, por lo que prácticamente las corrientes inducidas se presentan en la superficie del material. A este fenómeno se le denomina “efecto de pantalla” y se debe al campo magnético secundario que las mismas corrientes inducidas producen. Así, los parámetros que tienden a incrementar la densidad de

corriente inducida (ie conductividad, ó permeabilidad magnética), también aumentan la intensidad del campo magnético secundario, por lo que disminuyen la capacidad de penetración en el material, resultando un efecto de pantalla mucho mayor. [29]

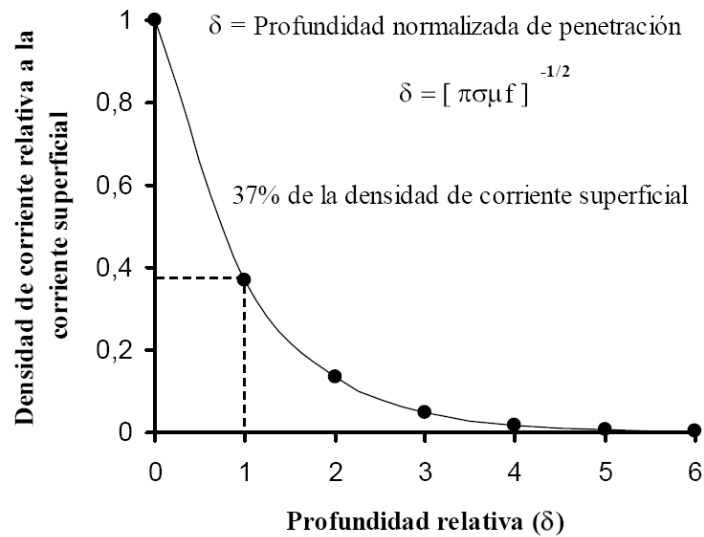


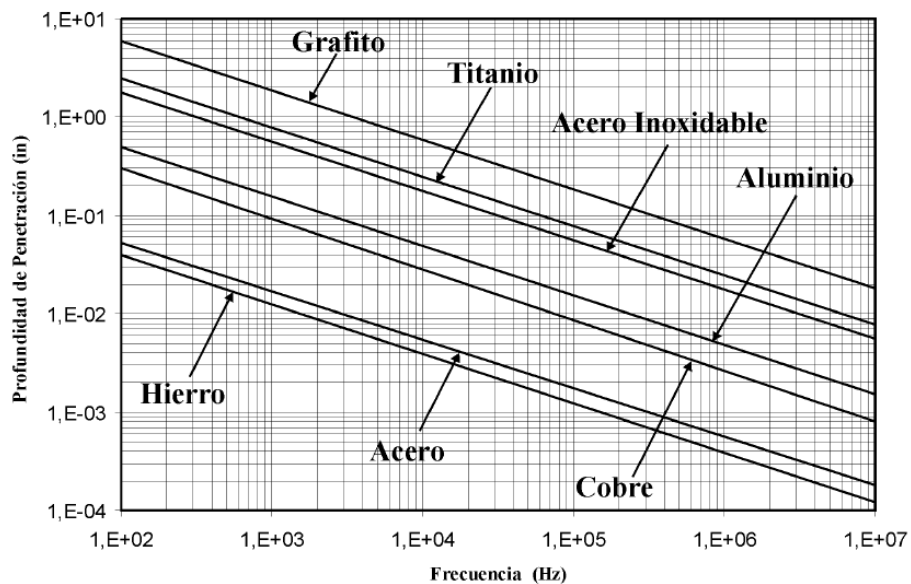
Fig. 17. Densidad de corriente vs profundidad relativa. [28]

La profundidad normalizada de penetración  $\delta$ , se define como la profundidad a la cual la densidad de corriente ha disminuido a un 37% (es decir, a un 1/e %) del valor en la superficie. Este parámetro se define de la siguiente manera:

$$\delta = [\pi\sigma\mu f]^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Donde  $\sigma$  es la conductividad del material;  $f$  la frecuencia de la corriente alterna en la bobina, y  $\mu$  la permeabilidad magnética del material.[29]

En la figura 18 se aprecian las gráficas típicas de la profundidad normalizada de penetración como función de la frecuencia para diferentes materiales. Nótese que dicha profundidad aumenta inversamente con la frecuencia, por lo que se definen dos rangos de inspección: corrientes Eddy de baja frecuencia (LFEC), que corresponden a valores de frecuencia entre 100 Hz y 50 kHz; y corrientes de Eddy de alta frecuencia (HFEC) para frecuencias mayores de 100 kHz.(3)



**Fig. 18.** Profundidad de penetración para distintos materiales a distintas frecuencias [3]

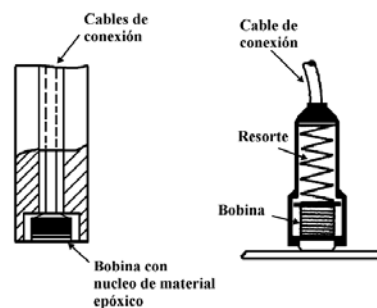
### 2.5.2.2. Tipos de Bobinas

A continuación se muestran los tres tipos básicos de sensores o bobinas que se utilizan en la inspección no destructiva por corrientes parásitas: bobinas de superficie, bobinas exteriores, y bobinas interiores. A pesar de que los tres tipos son diferentes, en todos los casos las corrientes inducidas fluyen sobre la superficie del material en dirección paralela a la orientación de la bobina. Es importante destacar que la intensidad de las corrientes inducidas es mayor sobre

la superficie, y disminuye rápidamente con la profundidad; es por esto, que son más sensibles a discontinuidades superficiales orientadas perpendicularmente a la dirección de las corrientes inducidas. [29]

### **Bobinas de superficie**

Se emplean para inspecciones en superficiales relativamente planas, donde la corriente inducida sigue un patrón circular con un diámetro similar al de la bobina. Por lo general, la bobina se envuelve en un núcleo ferromagnético que concentra el flujo de campo magnético en un volumen mucho menor, con lo que se aumenta la sensibilidad a las discontinuidades muy pequeñas. En la figura 19 aparecen diferentes tipos de probadores superficiales. [29]

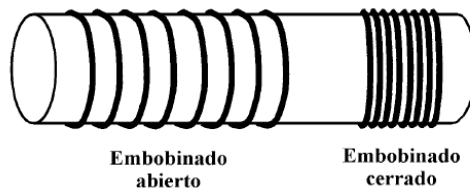


**Fig. 19.** Bobinas de superficie [28]

### **Bobinas exteriores**

Se conocen también como sensores de diámetro exterior o envoltentes, y se aplican en la detección de defectos longitudinales en tubos y barras metálicas. En este tipo de sensores, las bobinas se enrollan alrededor del espécimen de manera que las corrientes inducidas fluyen en dirección circunferencial, lo que permite sean muy sensibles a los defectos orientados en la misma dirección del eje de la bobina. [28]

En igual forma que las bobinas superficiales, el flujo de corriente inducida es mayor en la superficie y decrece significativamente con la profundidad. Como se puede observar en la figura 20, la longitud de la bobina y el número de espiras por unidad de longitud pueden ser variables, de manera que se diseñan para aplicaciones particulares. Así, una bobina grande con espiras poco cerradas es para evaluar propiedades globales del material, como es la conductividad; por otro lado, las bobinas pequeñas muy cerradas se emplean para evaluar áreas pequeñas e identificar defectos muy chicos.[28]



**Fig. 20.** Bobina exterior [28]

### **Bobinas para interiores**

Son sensores muy semejantes a las bobinas exteriores; se conocen también como sensores de diámetro interno y se emplean para inspecciones en el interior de barrenos o tubos (figura 21). Tienen muy alta sensibilidad a los defectos superficiales con orientación paralela al eje de la bobina. [28]

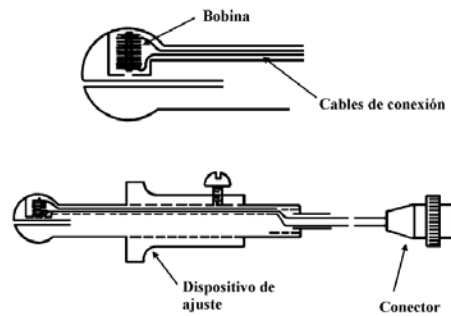


Fig. 21. Bobina para interiores [28]

### 2.5.2.3. Criterios para la selección de la frecuencia de la señal AC. [28]

Uno de los parámetros más importantes en la inspección de materiales conductores mediante la técnica de corrientes inducidas, es la selección de la frecuencia AC que se inyecta a las bobinas exploradoras (sondas). Su adecuada selección depende de los siguientes factores:

- a. Espesor del material a ser inspeccionado.
- b. Profundidad de penetración deseada.
- c. Sensibilidad requerida
- d. Tipo de aplicación.
  - d.1 Detección de discontinuidades.
  - d.2 Clasificación de materiales.
  - d.3 Medición de espesor.
  - d.4 Metrología.
  - d.5 Evaluación de tratamientos térmicos.
  - d.6 Medición de propiedades.
  - d.8 Otras.
- e. Medición de velocidad de paso de un componente.

## **Efecto de la profundidad de penetración**

En la aplicación de la técnica siempre se va a desear que las corrientes inducidas alcancen la mayor penetración posible, esto puede lograrse a través del ajuste de la frecuencia AC. Esta selección siempre tendrá un compromiso entre profundidad de penetración y la sensibilidad requerida, debido entre otras cosas al efecto piel.

Menor frecuencia implica una mayor capacidad de penetración, mas no significa una mayor sensibilidad, por el contrario mayor frecuencia mayor sensibilidad a la detección. En la práctica se debe seleccionar la mayor frecuencia posible en compatibilidad con la profundidad a alcanzar en la inspección. Un criterio de los especialistas a la hora de realizar una inspección es seleccionar la profundidad estándar de penetración de manera que cumpla:

$$3\delta = \textit{espesor de la pieza} \quad (7)$$

## **Efecto sobre la sensibilidad**

En cualquier técnica e Ensayos no destructivos, la sensibilidad que se logre es de vital importancia, ya que nos indica cual será la discontinuidad mas pequeña. Para su ajuste generalmente se dispone de dos criterios:

1. Ajuste de sensibilidad mediante discontinuidad patrón.
2. Ajuste de sensibilidad mediante el tamaño de la bobina.

### 2.5.3. Método de tomografía de impedancia

La siguiente técnica experimental que consiste en la implantación de métodos numéricos para obtener la conductividad estratificada partiendo de consideraciones de simetría en función de la profundidad, Los resultados que se obtienen mediante resolución del problema inverso electromagnético aplicando corriente directa.[25]

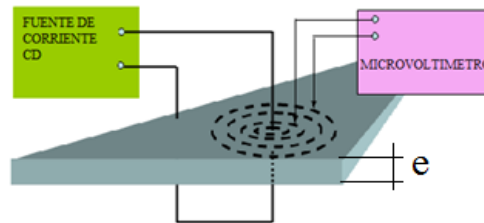
La ecuación a resolver para la solución del problema, directo es

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (8)$$

Donde:  $\sigma$  es la conductividad eléctrica,  $\varphi$  el potencial eléctrico y  $\rho$  la densidad de carga. Desarrollando la ecuación en coordenadas cilíndricas, con  $z$  la dirección normal y suponiendo que  $\sigma$  sólo depende de la distancia a la superficie, se obtiene

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \sigma \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right) + \sigma \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (9)$$

En este caso, el problema directo consiste en determinar los potenciales a partir de la conductividad y del valor de las fuentes. Se trata de determinar la conductividad de la  $i$ ésima capa o estrato, conociendo la fuente (corriente suministrada) y el potencial en la superficie. [25]



**Fig. 22.** Disposición para la captura de datos experimentales. Los círculos concéntricos representan equipotenciales. Se determinan las diferencias de potencial para distancias de los electrodos desde 0,1 mm hasta 1 mm con un espaciamiento de 0,1 mm.



La corriente eléctrica se aplica mediante electrodos puntuales. La configuración básica de electrodos será la colocación de un electrodo lejos de los bordes. El circuito se cierra mediante contactos lejanos distribuidos conservando la simetría. A partir de esta configuración, utilizando la simetría y por superposición se pueden obtener otras configuraciones de pares de electrodos dispuestos a un lado o a ambos lados de la lámina. La configuración para la captura de datos experimentales es la de dos electrodos colocados alineados a cada lado de la lámina como se muestra la **figura 22**. Los datos experimentales son las medidas de los potenciales en función de la distancia a los electrodos a ambos lados de la lámina, para una corriente de alimentación establecida. [26]

Para la configuración descrita, se hace pasar una corriente regulada mediante una fuente simétrica con toma central a tierra. La conexión central a tierra se conecta a la lámina lejos de los electrodos. De esta manera se obtienen equipotenciales circulares, centradas en los electrodos y el plano de simetría tiene potencial cero. En algunos casos esto tiene la ventaja de que la discretización se hace de un solo lado, con lo cual se obtiene mayor resolución, sin aumentar el costo computacional, pero tiene la desventaja de que introduce como incógnitas las corrientes en los elementos contiguos al plano de simetría. Para simetría axial, la ecuación 10 (problema inverso electromagnético) se expresa en diferencias con paso de discretización  $h$  y se obtiene la siguiente expresión:

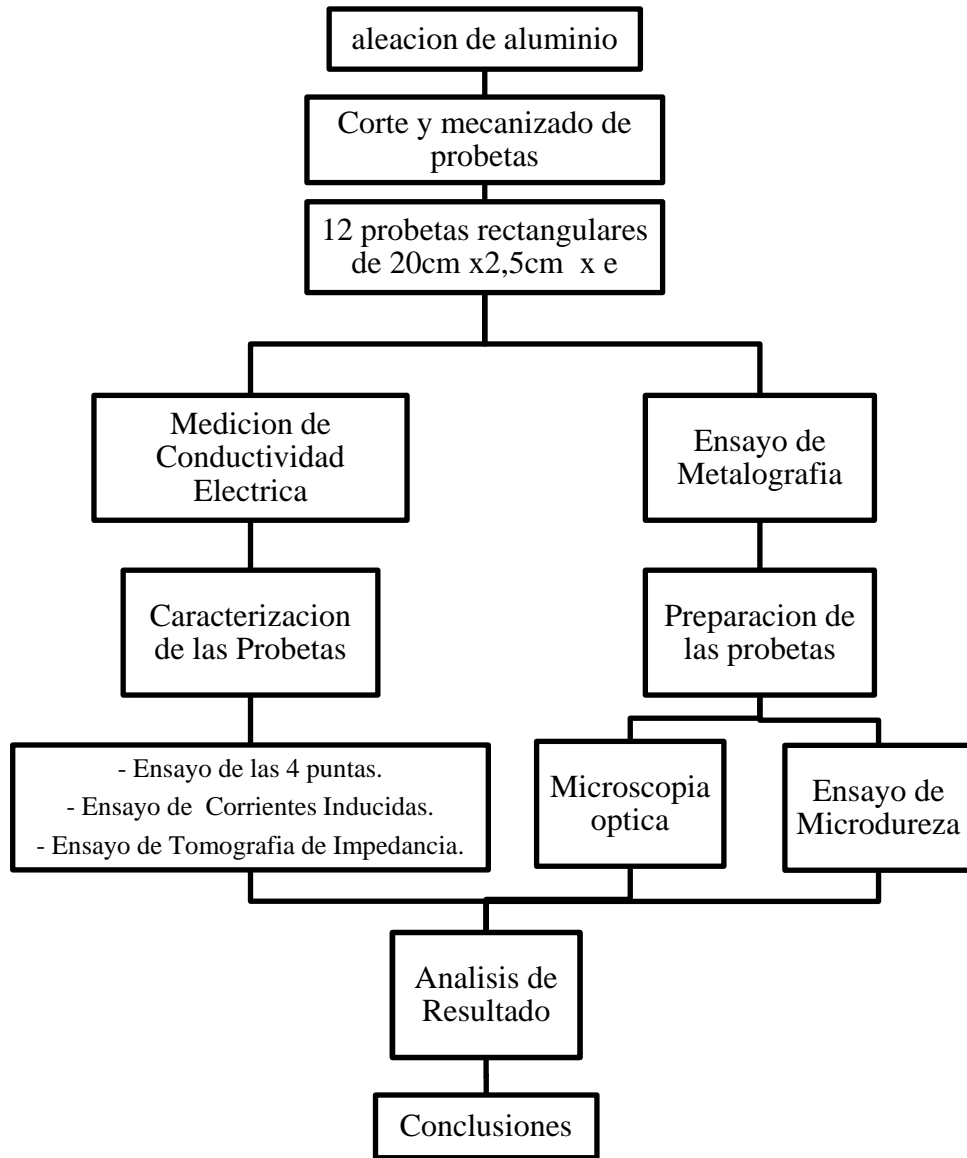
$$\begin{aligned}
 (\sigma_{i+1} - \sigma_{i-1})(\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i-1,j}) + 4\sigma_i \left( \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i-1,j}}{2j} + \varphi_{i,j+1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1} \right) + \\
 4\sigma_i (\varphi_{i+1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i-1,j}) = -\frac{4I}{h} \sum_{i_0, j_0} \delta(i - i_0, j - j_0)
 \end{aligned} \quad (10)$$

Donde  $J$  es el índice de discretización en la dirección radial e  $i$  el correspondiente la profundidad ( $z$ ),  $h$  es el parámetro de red,  $i_0, j_0$  representan la posición de las fuentes. En este caso, el problema directo consiste en determinar los potenciales a partir de la conductividad y del valor de las fuentes. El problema inverso consiste en determinar la conductividad de la  $i$ ésima capa o estrato, conociendo la fuente (corriente suministrada) y el potencial en la superficie. [26]

**González, et al [33]**, evaluaron conductividad macroscópica y superficial partiendo de consideraciones de simetría, de un material laminado en frío y luego tratado térmicamente. Los resultados muestran que el material tiene una conductividad eléctrica estratificada, dependiente de la distancia a la superficie normal a la dirección de laminación. En este trabajo se utiliza esta consideración para determinar la dependencia de la conductividad con la distancia desde la superficie. En la preparación de probetas hay variaciones de recristalización entre 0% 100% y se determinó la conductividad macroscópica CD mediante el método de 4 puntas y medición de diferencia de potenciales radiales (variante de tomografía de impedancia). Los resultados muestran que los cambios de conductividad macroscópica medidos se producen fundamentalmente en la superficie (laminada), mientras que la conductividad en el seno del material cambia de manera imperceptible. Como conclusión se verificó que la variación de conductividad macroscópica o media es atribuible a la variación de la conductividad superficial.

### CAPITULO III

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL



**Fig. 23.** Organigrama general del procedimiento experimental propuesto.

### 3.1. Obtención de muestras.

El material utilizado fue una aleación de aluminio AA8011-M, la cual es una aleación Al-Fe-Si suministrado por la empresa C.V.G. ALUMINO DE CARABOBO S.A. (ALUCASA), en planchones producidos por colada continua y posteriormente laminado en frío

### 3.2. Análisis Químico

La composición química del material según la ASM Internacional se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 8.** Composición química del aluminio AA 8011. [1]

Composición química nominal de la aleación de aluminio AA8011								
%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Zn	%Ti	Otros
0.50-0.9	0.6-1.0	0.10	0.20	0.05	0.05	0.10	0.08	0.15

Por medio del estudio de composición química realizado en la trabajo especial de grado **“ESTUDIO SOBRE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA LA OBTENCIÓN DE FOIL DE ALUMINIO SIN LA APLICACIÓN DE RECOCIDOS INTERMEDIOS”** se conoce que el material utilizado presenta la composición de silicio y hierro mostrado en la tabla.

**Tabla 9.** Composición química del material a estudiar.

Composición química del material a estudiar	
%Si	%Fe
0.27±0.01	0.87±0.01

### 3.3. Corte y mecanizado de probetas

Para obtener las probetas de las láminas gruesas se realizaron cortes primarios con segueta, y con exacto en las láminas más delgadas, esto con la finalidad de obtener dimensiones mucho más manejables para su posterior mecanizado. Posteriormente se procedió a mecanizar las probetas con una fresadora Fig. 23 en el Taller de Maquinas Herramientas de Post-grado del Edificio de Física de la FI-UCV, con el fin de obtener probetas los mas rectangular posible y con un acabado en los cortes óptimo. Durante los procesos se utilizo taladrina como refrigerante para no alterar la microestructura del material por calentamiento.



**Fig. 24.** Fresadora del Taller de Maquinas Herramientas de Post-grado del Edificio de Física de la FI-UCV.

### 3.4. Tipos de probetas.

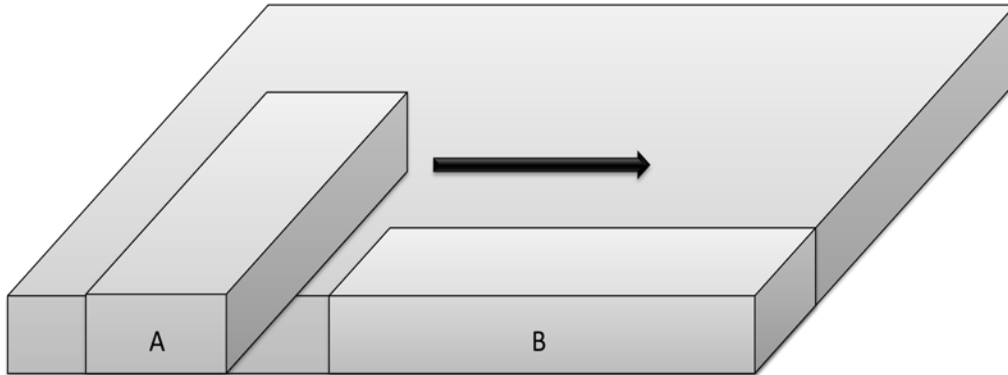
Se fabricaron 12 probetas rectangulares de 22 cm de largo con 2 a 2,5 cm aproximadamente de ancho según la norma ASTM B193-02, como se muestra en la figura 24, para evaluar la conductividad eléctrica utilizando la técnica de las 4 puntas, método de las corrientes inducidas y el método de tomografía de impedancia.



Fig. 25. Esquema de probeta plana utilizada para realizar los ensayos de conductividad.

### 3.5. Zona de Extracción de las Probetas.

Se extrajeron 2 probetas por cada lámina, la primera orientada de manera perpendicular a la dirección de laminado y la segunda orientada de manera paralela a la dirección de laminado, en la figura 25 se puede observar un esquema del plancho y la probetas. Adicionalmente antes de obtener las probetas se eliminó aproximadamente 1 cm de los bordes de las láminas para trabajar en zonas centrales de la muestra.



**Fig. 26.** Zonas de extracción de las probetas en el planchón de aluminio, (A) probeta perpendicular al sentido de laminación, (B) probeta paralela al sentido de laminación.

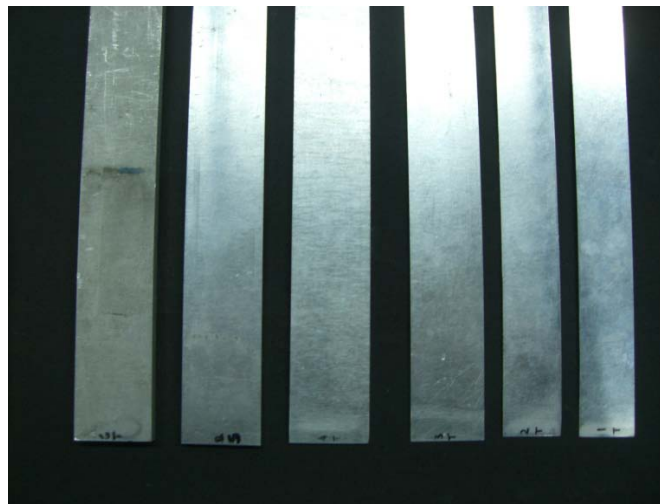
### **3.6. Caracterización de probetas**

Se realizaron mediciones de las dimensiones de todas las probetas, el largo y ancho se midieron con un vernier marca Somet de apreciación de 0.02 mm, los espesores fueron medidos con un tornillo micrométrico marca Mitutoyo modelo N°293-369 de apreciación 0.001 mm y por último se verificó experimentalmente la densidad del material.

La denominación de las probetas se realizó según su espesor y la orientación en las que fueron extraídas del material, las que fueron cortadas paralelas al sentido de laminación se designan con la letra L y las que fueron cortadas perpendicularmente a la laminación se designan con la letra T. a continuación se muestra la tabla

**Tabla 10.** Espesor de probetas

Probeta	Espesor (mm)
1L	0,141
2L	0,303
3L	0,617
4L	1,603
5L	3,103
6L	6,044
1T	0,156
2T	0,315
3T	0,505
4T	1,523
5T	3,046
6T	6,047



**Fig. 27.** Probetas Longitudinales, ordenas por reducción de espesor.



### 3.7. Medición de conductividad eléctrica.

En esta etapa se procedió a medir la conductividad eléctrica del material utilizando el método de las 4 puntas, el método de corrientes inducidas y el método de tomografía de impedancia. La finalidad de estos ensayos es observar si existe algún cambio de conductividad entre las laminas transversales y longitudinales, además si existe alguna variación de conductividad con la disminución del espesor.

#### 3.7.1. Ensayo de las 4 puntas

Para poder desarrollar este método se realizó un montaje experimental donde se colocó la probeta sobre una lámina de plexiglás, esta probeta se encontraba conectada en uno de sus extremos a una **Resistencia variable (reóstato) amp (5-11 ohm) marca Central Scientific** y esta al igual que el otro extremo de la probeta se encontraba conectada a una **Fuente de poder triple output DC power supply 1660 modelo Bk precision**, la fuente se fijó en un valor de 2 Ampere. Encima de la probeta se colocó otra lámina de plexiglás, la cual presentaba 2 cuchillas que cumplían la función de contactos y se encontraban a una distancia constante de  $17.42 \pm 0.001$  cm. Las mediciones de voltaje se realizaron por medio de un **Multímetro digital marca Hp modelo 34401A** que se encontraba conectado a los extremos de las cuchillas, en la figura 2.5 se muestra un esquema del montaje y en la figura 2.6 se muestra el montaje realizado.

**Fig. 28.** Esquema del montaje del ensayo de 4 puntas.

Se realizaron 3 mediciones en cada probeta variando la posición de la lamina de plexiglás que se encontraba en la parte superior, con esto se obtuvo un promedio de la resistencia eléctrica en cada una de las probetas.

Este método se realizó a una temperatura ambiente aproximada de  $18 \pm 1$  °C y durante todo el proceso se monitoreó la temperatura de cada una de las probetas utilizando un **Termómetro infrarrojo marca Cenco**, cabe destacar que para mayor precisión para la obtención de la temperatura se colocó en todas las probetas una cinta adhesiva negra para maximizar la emisividad. Para evitar el calentamiento de las probetas y los equipos las mediciones se realizaban en períodos no mayores a 5 segundos y además se verificó que la superficie de las probetas estuviera limpia para garantizar un buen contacto.

Los valores de resistividad del material se obtuvieron mediante la ecuación de la Ley de Ohm

$$V = I \times R$$

Donde:

V = Voltaje (volt).

I = Intensidad de corriente (amperios).

R = Resistencia (ohm).

Después de obtener los valores de resistencia estos fueron ajustados a la temperatura de referencia por medio de la siguiente ecuación:

$$R_T = \frac{R_t}{1 + \alpha_T(t - T)} \quad (11)$$

Donde:

$R_T$  = Resistencia a la Temperatura de referencia T.

$R_t$  = Resistencia medida a la temperatura t.

$\alpha_T$  = Coeficiente de Temperatura.

T = Temperatura de referencia.

t = Temperatura en la que se realizó la medida.

Luego de obtener los valores de resistencia ajustado a la temperatura se procedió a calcular la resistividad de masa utilizando la ecuación

$$\rho_W = \left( \frac{W}{L_1 L_2} \right) \times R \quad (12)$$

Donde:

$\rho_W$  = Resistividad de masa.

W = Peso de la probeta.

$L_2$  = Longitud de la probeta.

$L_1$  = Longitud entre las cuchillas.

R = Resistencia ajustada a la temperatura de referencia.

La resistividad de Volumen es:

$$\rho_v = \rho_w / \text{densidad} \quad (13)$$

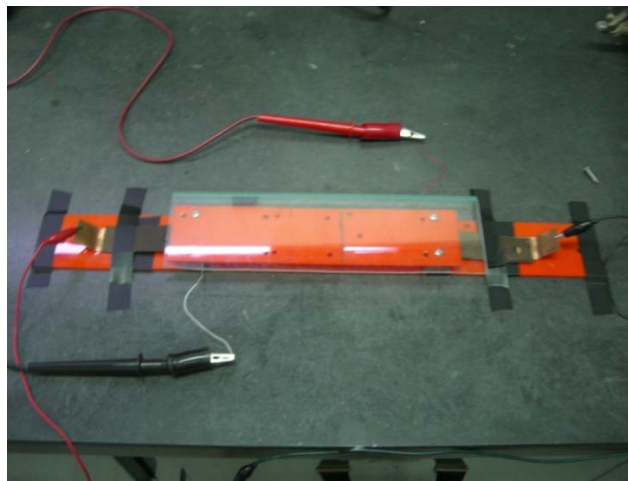
Para culminar con este método se obtuvo el valor de conductividad utilizando la siguiente ecuación

$$\sigma = \frac{1}{\rho_v} \quad (14)$$

Donde:

$\rho_v$  = Resistividad de volumen.

$\sigma$  = Conductividad.



**Fig. 29.** Montaje del ensayo 4 puntas.

### 3.7.2. Ensayo de corrientes inducidas

Para realizar las mediciones por el método de corrientes inducidas se utilizó un equipo de inducidas marca MAGNAFLUX modelo ED810 con 2 palpadores para medir conductividad con capacidad de hasta 200 KHz.

Este equipo presenta un pantalla dividida en cuadrículas (diagrama de impedancia), las cuales permiten tener una noción de la conductividad de un material conductor de forma cualitativa mediante un patrón de referencia.

Antes de realizar las medidas se tomaron en cuenta ciertos aspectos importantes para garantizar una evaluación precisa de la conductividad eléctrica, siguiendo la norma ASTM E1004. [34]

- Temperatura y humedad relativa: se realizaron las mediciones bajo una temperatura cercana a los 20°C, ya que la norma recomienda realizar mediciones de conductividad a la temperatura ambiente. Se verificaba la temperatura de la muestra antes y después de realizar la medición para garantizar esto. Se observó que la humedad permanecía entre 50-80% recomendable para las mediciones.
- Acoplamiento del metal a la sonda de la bobina: en el momento de realizar la medición se logró un acoplamiento óptimo del palpador con la superficie de la muestra ya que eran planas, es decir, existía un contacto completo y directo de la bobina y la muestra. en el momento de realizar el contacto y al momento de despegar el palpador de la muestra se realizaban con movimientos leves para evitar distorsión en la medición. La norma indica que existen variaciones en la separación del

palpador y la superficie de la muestra (Lift-off), estos puede originar cambios en la señal del instrumento.

- Efecto de borde: las mediciones realizadas fueron hechas en el centro de las muestras para evitar distancias menores a dos diámetros de bobina de cualquier discontinuidad como el borde, estos es recomendado por la norma.
- Homogeneidad de la muestra: las muestras fueron examinadas para evitar que las mediciones fueran hechas cerca de defectos en la superficie.
- Condiciones de superficie: las muestra fueron limpiadas antes de realizar las mediciones para evitar la existencia de grasa o refrigerante utilizado durante el maquinado.
- Estabilidad del instrumento: el equipo de corrientes inducidas era encendido con un tiempo suficiente de antelación (aproximadamente 1 hora) a las mediciones para permitir que se estabilizara, las mediciones se realizaron después de las 6:30 de la tarde para procura que no hubieran muchos aparatos encendidos en el edificio que provocaran distorsión en las ya que el equipo es demasiado sensible.
- Manipulación de la bobina en las mediciones: la bobina que se utilizo presentaba un material aislante que la que la recubría para facilitar su manipulación y evitar que la transferencia de calor de la mano afectaran las mediciones.

- Espesor de la muestra: según la norma la densidad de la corriente disminuye exponencialmente con la profundidad. La profundidad a la que la densidad de la corriente es de aproximadamente el 37% (1/e) de su valor superficial recibe el nombre de nivel estándar de profundidad de penetración  $\delta$ . Utilizando la ecuación se calculo el nivel estándar de profundidad de penetración para las frecuencias 100 Khz, 90 Khz, 80 Khz, 70 Khz, 60 Khz y 50 Khz. Se observó mediante esto que solo se pudo realizar las mediciones para probetas con espesores mayores a 1,5 mm de espesor.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4\pi\mu_r\mu_o f}} \quad (15)$$

Donde:

$\delta$  = Profundidad estándar de penetración.

$\mu_r$  = Permeabilidad magnética relativa.

$\mu_o$  = Permeabilidad magnética de vacío.

f = Frecuencia.

**Tabla 11.** Medidas de profundidad estándar de penetración

$\mu_r$	$\mu_o$	f (Hz)	$\delta$ (mm)
35,5	1,25	100000	0,26782794
35,5	1,25	90000	0,282315437
35,5	1,25	80000	0,29944074
35,5	1,25	70000	0,320115616
35,5	1,25	60000	0,345764383
35,5	1,25	50000	0,378765905

### **3.7.2.1. Calibración del equipo.**

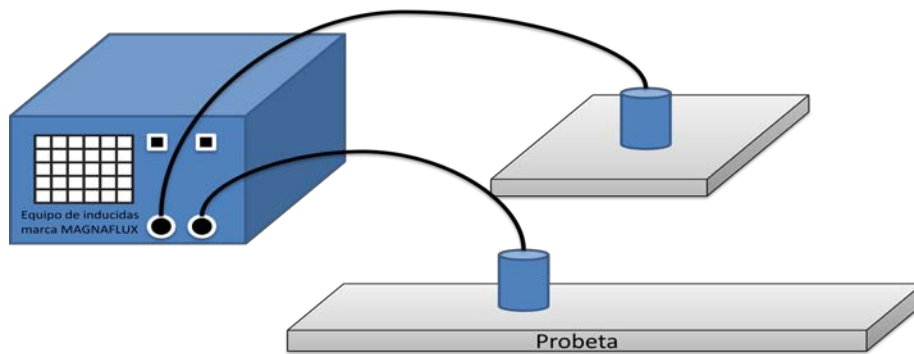
El equipo de corrientes inducidas fue calibrado respecto a divisiones mediante la variación de temperatura entre las probetas 6T y 6L provenientes de colada continua. Esto se logró calentando la temperatura de la probeta 6T utilizando una hornilla eléctrica aproximadamente unos 20°C con respecto a la temperatura de la probeta 6L (muestra de referencia). Luego a medida que la temperatura de la probeta 6T disminuía se obtuvieron 6 medidas de separación entre las impedancias de las dos probetas obtenidas directamente de la pantalla mediante una escalímetro, este procedimiento se repitió para frecuencias del equipo de 100Khz, 90Khz, 80Khz, 70Khz, 60Khz hasta 50Khz manteniendo el valor de ganancia en 40 dB, con esto se obtuvieron los datos para construir una grafica de variación de temperatura versus el numero de divisiones para la distintas frecuencia mencionadas.

### **3.7.2.2. Procedimiento.**

Para realizar la mediciones uno de los palpadores se colocado durante todo el proceso sobre la superficie de un metal base, el otro palpador era utilizado para realizar las mediciones sobre las probetas. Se utilizo la probeta 6L como probeta comparativa, el palpador se coloco sobre la superficie de la misma para centrar el cursor de la pantalla en el centro del diagrama de impedancia y obtener la medición. La probeta 5T y 4T fue comparada con las probetas 6L (referencia), esto se realizo colocando el palpador suavemente sobre la superficie de la probeta 6L y se retiraba suavemente en un lapso muy corto para obtener una medición luego se realizaba lo mismo con las probetas mencionas y por medio de la escala se obtenía una medida entre la dos mediciones, en la Figura 29 se observa un esquema del montaje del ensayo.



Este proceso se realizo para las frecuencias mencionadas anteriormente con una ganancia de 40 dB.



**Fig. 30.** Esquema del ensayo corrientes inducidas.

Luego de obtener todos los valores de medidas, se procedió a introducir esos valores según la frecuencia utilizada, en las ecuaciones de las rectas obtenidas en las graficas de calibración y se obtuvo el valor de la diferencia de temperatura para cada una de esas medidas. Este valor calculado se introdujo en la ecuación para obtener los valores de resistividad de las distintas probetas.

$$\rho_t = \rho_T \times (1 + \alpha_T(t - T)) \quad (16)$$

Donde:

$\rho_t$  = Resistividad a la temperatura t a la cual corresponde el numero de divisiones.

$\rho_T$  = Resistividad a la temperatura T de referencia.(obtenido de 4 puntas)

$\alpha_T$  = Coeficiente de temperatura T.

t = Temperatura a la cual corresponde el numero de divisiones.

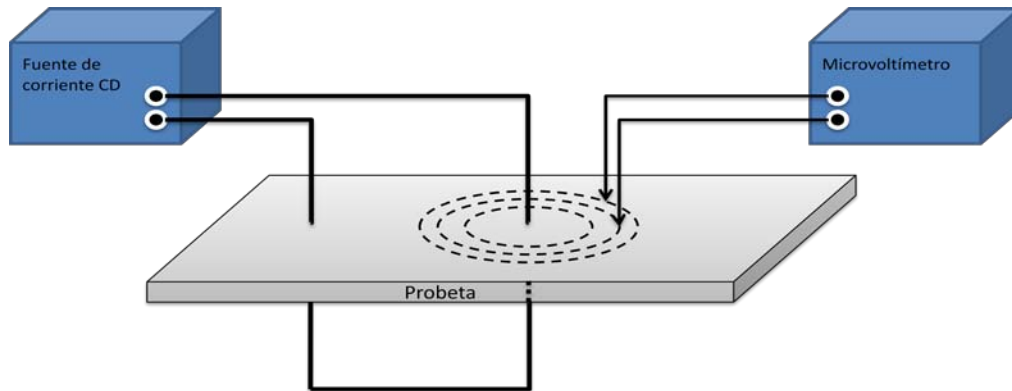
T = Temperatura de referencia.



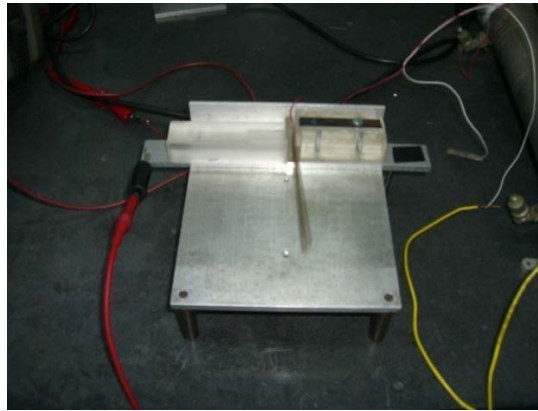
**Fig. 31.** Ensayo de Corrientes Inducidas

### **3.7.3. Ensayo de Tomografía de impedancia.**

Para desarrollar este ensayo se realizó un montaje que consistía en colocar 2 electrodos afilados contrapuestos en ambas caras de la probeta a través de los cuales se hacía circular una corriente una corriente de 2 Amperes, utilizando la Fuente de poder triple output DC power suply 1660 modelo BK precisión, también en este circuito se utilizo una Resistencia variable (reóstato) amp (5-11 ohm) marca Central Scientific. Se coloco un tercer electrodo en una de las caras, este se encontraba conectado al Multímetro digital marca HP modelo 34401A (voltaje) al igual que uno de los extremos de la probeta, con esta conexión se fue tomando los valores de diferencia de potencial a medida que se separaba el electrodo conectado al multímetro de la línea por la cual circulaba la corriente. Para lograr esta separación se utilizaron láminas aislantes con un espesor de 0,1 mm, esta diferencia de potencial se midió para intervalos de separación desde 0,1 mm hasta llegar a 1 mm, en la Figura 32 se muestra un esquema del montaje utilizado para realizar el ensayo de tomografía de impedancia. Los resultados se obtienen luego de la aplicación del algoritmo de inversión de los datos experimentales (MAPLE).



**Fig. 32.** Esquema del ensayo de tomografía de impedancia.



**Fig. 33.** Banco experimental para ensayo de Tomografía de Impedancia.

### **3.8. Microscopia óptica.**

#### **3.8.1. Preparación de la muestra.**

Para realizar los ensayos de microscopia óptica, las probetas fueron extraídas de las probetas transversales utilizadas en los ensayos de conductividad, utilizando la cortadora con disco de diamante del Laboratorio de Desgaste y Lubricación de la EIM-UCV.

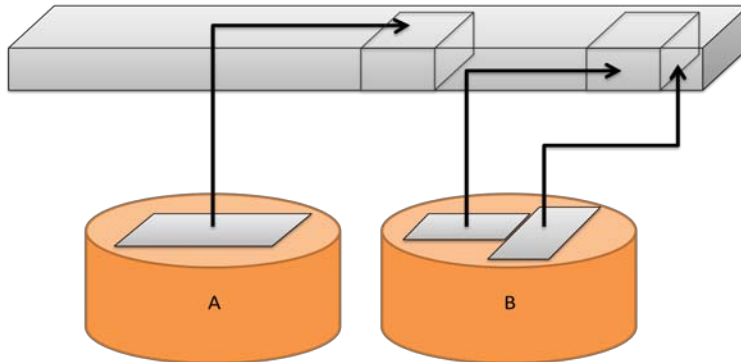
Se extrajeron tres muestras, la primera de la zona superficial, la segunda de la sección longitudinal y la tercera de la sección transversal, como se observa

en la figura 35. Cabe destacar que fue imposible obtener muestras tanto transversales como longitudinales de las 2 probetas más delgadas debido a las complicaciones que mostraban estas a la hora de su preparación.

Estas muestras fueron embutidas en una resina (backelita), en la embutidora del laboratorio de metalografía de la EIM-UCV fig. 34, que presentaba las siguientes características: 2 Ton de presión y una temperatura de 90 °C aproximadamente; esto con el fin de facilitar el manejo de la muestra para poder realizar el desbaste, el pulido y el ataque electrolítico.

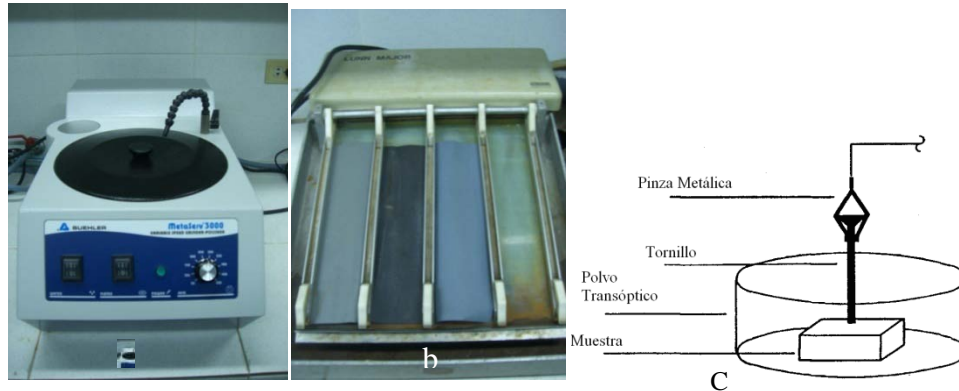


**Fig. 34.** Embutidora Prestospress marca Struers.



**Fig. 35.** Esquema de extracción de muestras para realizar ensayo de metalografía, (A) montaje de muestra superficial, (B) montaje de muestra transversal y muestra longitudinal.

A todas las probetas se les realizó un desbaste inicial utilizando equipo de desbaste manual (fig. 36 b), con papel de lija de 320, 400, 600, 1200, 1500 y 2000, siguiendo la secuencia del papel de grano más grande al papel de grano más bajo y rotando la probeta  $90^\circ$  cada vez que se cambia de papel. Luego de ser lijadas se colocaba las probetas en la pulidora Metaserv 3000 variable speed grinder-polisher marca Buehler del laboratorio de metalografía de la EIM-UCV (figura 36 a) , primero se utilizó el paño de tipo Billard Cloth empleando alúmina de  $1\ \mu\text{m}$  a una velocidad de 500 rpm colocando la probeta fija 5 minutos en un sentido y luego girando  $90^\circ$  fija en el otro sentido también por 5 minutos, después se cambia a un paño Micro Cloth empleando igual mente alúmina de  $1\ \mu\text{m}$  y una pequeña cantidad de jabón Las Llaves liquido a una velocidad de 500 rpm, la probeta se hacía girar en contra del sentido de giro de la maquina.



**Fig. 36.** (a) Pulidora Metaserv 3000 variable speed grinder-polisher marca Buehler, (b) Equipo de pulido manual Lunn Major marca Struers. c) Contacto eléctrico

Una vez que la muestra presentaba un acabado especular deseada, se realizó el ataque electrolítico con el fin de revelar la microestructura del mismo, para lo cual se usó una fuente de poder marca Volt con las siguientes características: 110-120 voltios, 1,5 amperios y 50/60 Hz, en la cual se puede ajustar los voltajes que varían entre 0 y 30 voltios, el contacto eléctrico entre las probetas se logró mediante el uso de un tornillo que se adapta en la parte posterior de la probeta tal como se indica en la figura 36 c), esto se logro abriendo un agujero en la zonas posterior de las probetas para fijar el tornillo y que este tuviera contacto con la muestra; la solución utilizada como electrolito fue una mezcla de 26 ml de ácido fluorhídrico (HF) al 48 % y 487 ml de agua destilada. Se usó como cátodo una barra de acero inoxidable dentro de un vaso de plástico en el cual se vierte el electrolito, y como ánodo la probeta en sí acoplada con el tornillo, la cual al ser sumergida en el ácido cierra el circuito eléctrico. Se aplicó un voltaje de 25 V durante un tiempo entre 15 segundos, en la figura se presenta un esquema del montaje para mejor entendimiento de este procedimiento.

### 3.8.2. Observación de la muestra.

Se utilizaron 2 equipos, el microscopio óptico del laboratorio de metalografía de la EIM-UCV (figura 37) y el microscopio de microdureza del laboratorio de metrología de la EIM-UCV, este último presenta un filtro polarizador para poder revelar la estructura de grano, este equipo es mostrado en la figura. Es importante mencionar, que en esta técnica para obtener una imagen donde muestre la mayor cantidad de granos posibles, es necesario ir moviendo la muestra y el analizador, se procede a tomar la foto, cuando se encuentra una posición que subjetivamente revele la mayor cantidad de granos, esta modificación de la posición de la muestra y del analizador, dan como resultado que cada muestra observada por esta técnica, tendrá una posición individual óptima.



**Fig. 37.** Microscopio Viewmet marca Buehler, Camara Megapixel Firewire marca Pixelink.

### **3.9. Ensayo de Microdureza.**

#### **3.9.1. Preparación de las muestras.**

En este ensayo se utilizaron las mismas muestras obtenidas de las lamina 6, 5, 4 y 3 utilizadas para el ensayo metalográfico.

#### **3.9.2. Realización del ensayo.**

Para realizar este ensayo se utilizo el Microdurómetro Metallux marca Leitz que aparece en la figura 38, del laboratorio de metrología de la EIM-UCV. Se aplico en el centro de las probetas de sección longitudinal, una carga de 100 grf. Durante 10 seg, se realizaron 4 indentaciones en cada una de las probetas. Después se procedió a medir las longitudes de las diagonales de cada una de las indentaciones para realizar el cálculo de dureza Vickers a través de la formula siguiente:

$$HV = (18544 \times F)/d^2 \quad (17)$$

Donde:

F = Fuerza aplicada.

d = longitud de una de la diagonales de la huella.



**Fig. 38.** Microdurómetro Metallux marca Leitz



## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

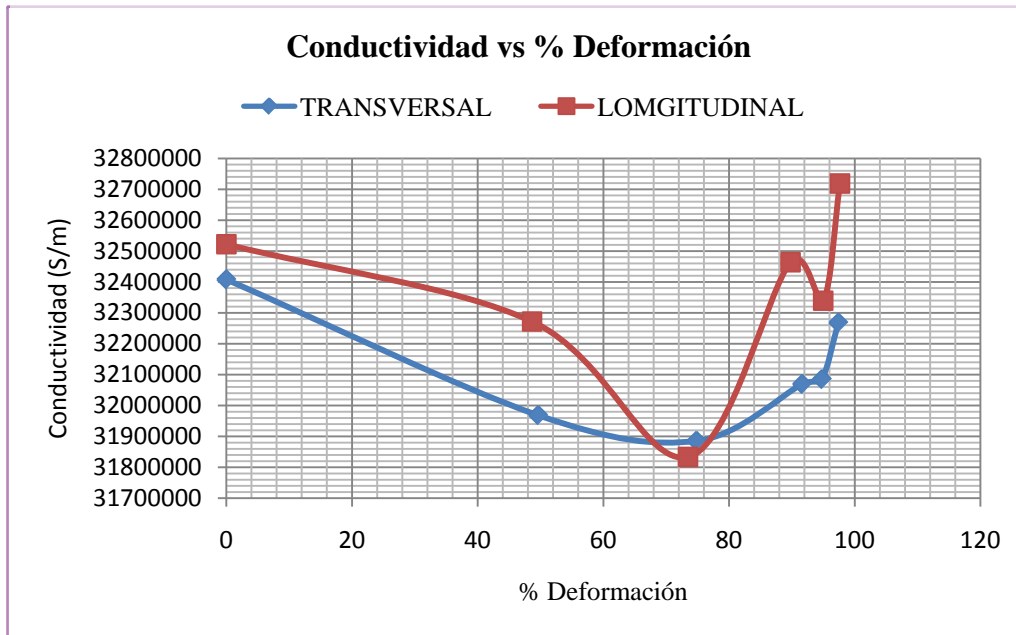
#### **4.1. MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD**

##### **4.1.1. Método de las Cuatro Puntas**

Para la aplicación del método de las cuatro puntas se procedió a obtener 3 medidas de diferencia de potencial y su correspondiente temperatura en cada una de las 12 probetas. Con los resultados que aparecen en la tabla 12 y los formulas ya explicados en el procedimiento experimental se procedió a calcular la resistencia ensayada (22 °C), luego la corregida (20°C) obteniendo la resistividad y por último la conductividad, siendo la variación del 0,99% con respecto a la temperatura ensayada.

La conductividad eléctrica de los metales se puede definir como la propiedad natural característica de un cuerpo que representa la facilidad con la que los electrones pueden pasar a través de él. En consecuencia los materiales metálicos tienden a disminuir su conductividad al ser sometido a deformación plástica, esto debido a que la distorsión de la estructura reticular impide el flujo de electrones aumentando su resistividad eléctrica. Se puede observar claramente (Fig. 39) que las probetas longitudinales presentan mayor conductividad que las probetas transversales, esto debido a que presentan un alargamiento de los granos en dirección de la deformación lo que representa una orientación

preferencial con respecto a la transversal y se traduce en una mayor facilidad para conducir los electrones.



**Fig. 39.** Grafica Conductividad Vs % Deformación, por el Método de las Cuatro Puntas

Como se puede observar en la fig. 39 hay una tendencia de aumento en la conductividad a partir de aproximadamente el 80% del % de disminución de espesor, debido a este comportamiento se puede inferir dos posible hipótesis:

1. Las láminas se sometieron a recocido.
2. La conductividad superficial aporta una mayor contribución que la volumétrica.

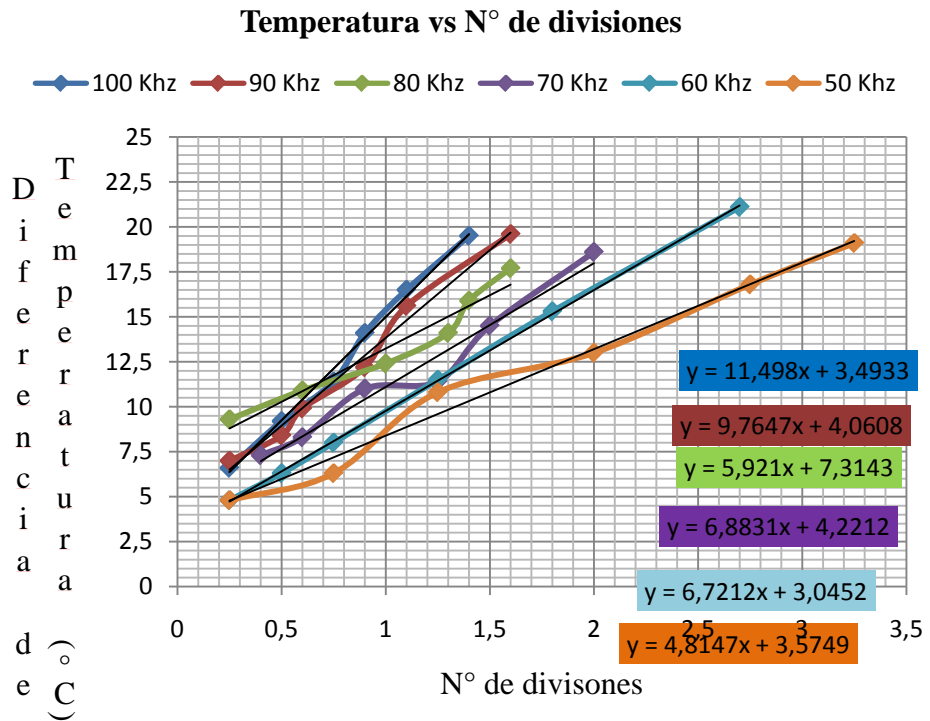
**Tabla 12** Valores de resistividad y conductividad obtenida para el método de 4 puntas.

Prob	% Defor	Masa (grs)	Volt aje(V x 10 <sup>-3</sup> )	Resistencia Experimental 1 (Ω x 10 <sup>-3</sup> )	Temperatura Experimental (°C)	Resistencia 20°C(Ω x 10 <sup>-3</sup> )	Longitud d cuchillas (m)	Longitud Probeta (m)	ρ Resistividad (Ω.m)	σ Conductividad (S/m)
1L	97,67	1,63	4,139	2,069	22,63	2,048	0,1742	0,231	3,056E-08	32719013,1
2L	94,99	3,53	1,933	0,966	22,53	0,957	0,1742	0,231	3,092E-08	32339276,9
3L	89,80	8,125	0,839	0,419	22,40	0,416	0,1742	0,232	3,08E-08	32464116,7
4L	73,47	22,29	0,312	0,156	22,30	0,155	0,1742	0,233	3,141E-08	31833301
5L	48,66	41,88	0,163	0,082	22,30	0,081	0,1742	0,232	3,099E-08	32272042,6
6L	0,00	78,975	0,0856	0,043	22,13	0,042	0,1742	0,231	3,075E-08	32522344,4
1T	97,41	1,66	4,119	2,059	22,60	2,039	0,1742	0,231	3,099E-08	32268401,9
2T	94,79	3,675	1,874	0,937	22,97	0,926	0,1742	0,231	3,117E-08	32085357,9
3T	91,65	9,185	0,746	0,373	22,67	0,369	0,1742	0,230	3,118E-08	32069497,1
4T	74,82	26,245	0,264	0,132	22,63	0,130	0,1742	0,231	3,136E-08	31885723,2
5T	49,63	49,9	0,138	0,069	22,67	0,068	0,1742	0,231	3,128E-08	31968817,4
6T	0,00	94,91	0,0717	0,036	22,63	0,035	0,1742	0,231	3,086E-08	32408256

#### **4.1.2. Método de las corrientes inducidas.**

Para realizar este ensayo se emplearon las frecuencias 100 Khz, 90 Khz, 80 Khz, 70 Khz, 60 Khz, 50 Khz. en este ensayo solo fueron utilizadas las probetas con espesores mayores a 1,5 mm, esto porque como se explico en el marco teórico la profundidad de penetración calculada para las distintas frecuencias utilizadas excedían el valor recomendado para espesores menores al indicado anteriormente.

Como se explico en el procedimiento experimental se realizaron mediciones entre las probetas 6T y 6L a las frecuencias mencionadas anteriormente para elaborar curvas de calibración las cuales están representadas en la fig. 40 estas representan la repuesta del instrumento del diagrama de impedancia en función de la temperatura. El ajuste de mínimos cuadrados permite determinar una ecuación de una recta por medio de la cual se determina los valores aproximados de conductividad para las probetas a comparar

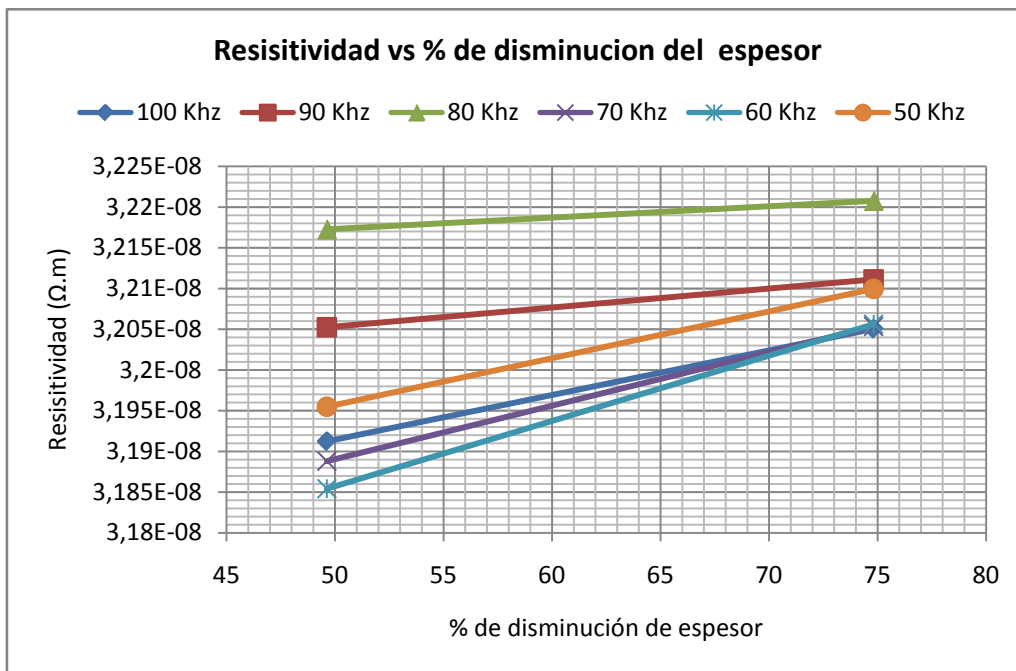


**Fig. 40.** Grafica de curvas de calibración para distintas frecuencias para Corrientes Inducidas.

**Tabla 13** Datos de conductividad y resistividad calculado a varias frecuencias por corrientes inducidas.

Probeta	100 KHz	90 KHz	80 KHz	70 KHz	60 KHz	50 KHz
<b>CONDUCTIVIDAD (S/m)</b>						
4T	31200662,39	31141835,42	31048548,54	31197868,87	31195234,84	31153034,17
5T	31335705,41	31198820,06	31082335,04	31359660,82	31392910,50	31294104,03
<b>RESISTIVIDAD (Ω.m)</b>						
4T	3,191E-08	3,205E-08	3,217E-08	3,190E-08	3,185E-08	3,195E-08
5T	3,205E-08	3,211E-08	3,221E-08	3,205E-08	3,205E-08	3,210E-08

En la Tabla 13 se observa los valores de conductividad y resistividad para cada una de las frecuencias utilizadas. Este ensayo se realizo en las probetas transversales ya que el campo originado por el palpador para realizar la medición se extiende en todas las direcciones y esta no se ve afectada por el sentido de laminación.



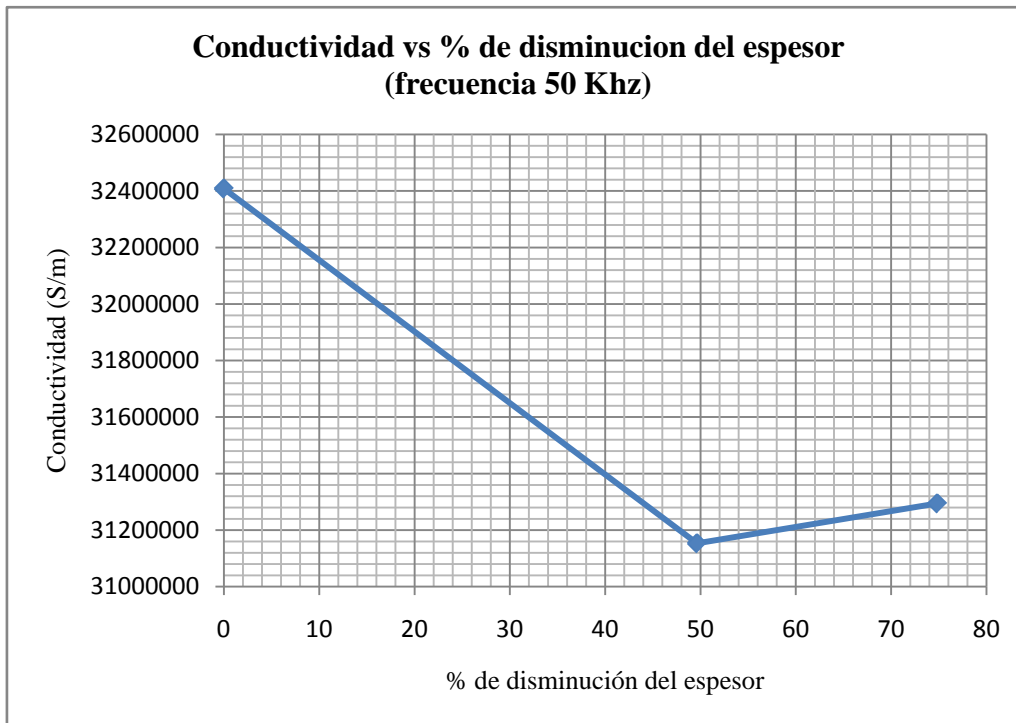
**Fig. 41.** Grafica de resistividad vs % de disminución del espesor para todas la frecuencias.

En la figura 41 se observa que para todas las frecuencias la resistividad aumenta a medida que incrementa el porcentaje de disminución del espesor, se selecciona las frecuencias 50 KHz ya que con esta el equipo realiza una medida de conductividad en la capa más profunda del material, además el fabricante del palpador utilizado recomienda utilizar esta frecuencia.

**Tabla 14** Valores de resistividad y conductividad en función del % de disminución de espesor.

Probeta	% de disminución de espesor	Resistividad ( $\Omega.m$ )	Conductividad (S/m)
6T	0	3,086E-08	32408256,01
5T	49,625	3,195E-08	31153034,17
4T	74,821	3,210E-08	31294104,03

La Tabla 14 muestra los datos de resistividad y conductividad en función con el porcentaje de disminución de espesores, para la frecuencia 50 Khz. En la figura 42 se observa claramente que la conductividad decrece a medida que el espesor de las láminas disminuye.



**Fig. 42.** Grafica de conductividad vs % de disminución del espesor.

### 4.1.3. Método de tomografía de impedancia

Este ensayo fue determinado la conductividad únicamente para las probetas 6T, 5T y 4T, debido a que para porcentajes menores de reducción de espesor conseguimos valores incoherentes, lo que nos indica que este método no es factible para espesores menores de 1,5 mm.

En la figura 43 se puede apreciar un predominio de la conductividad superficial sobre la volumétrica y su disminución a mayor porcentaje de disminución de espesor

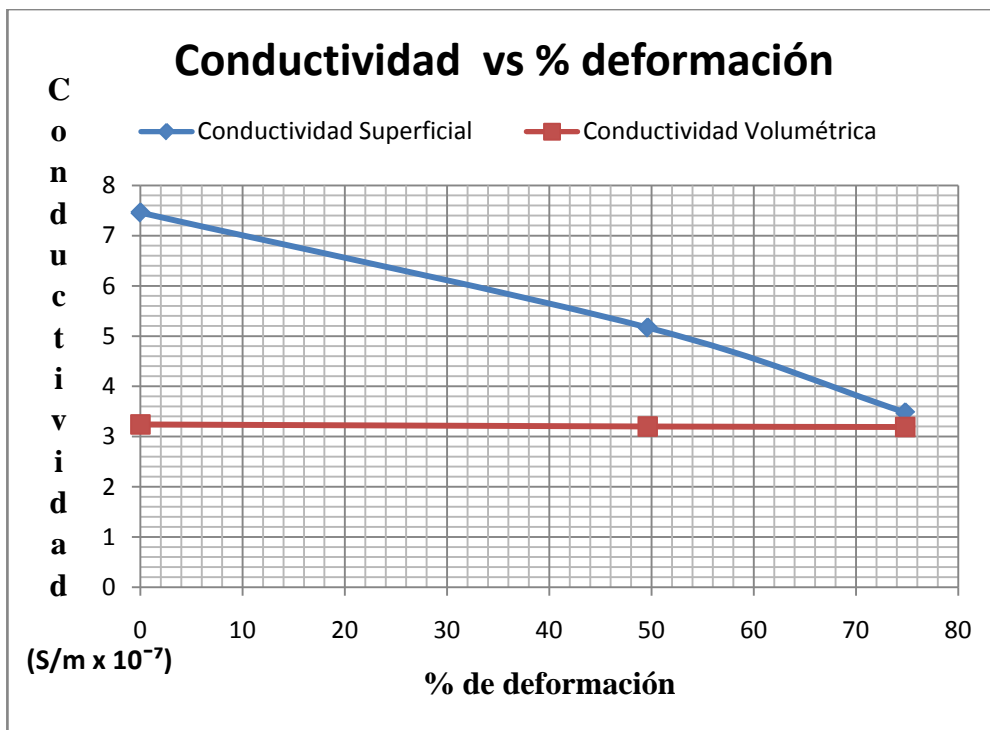


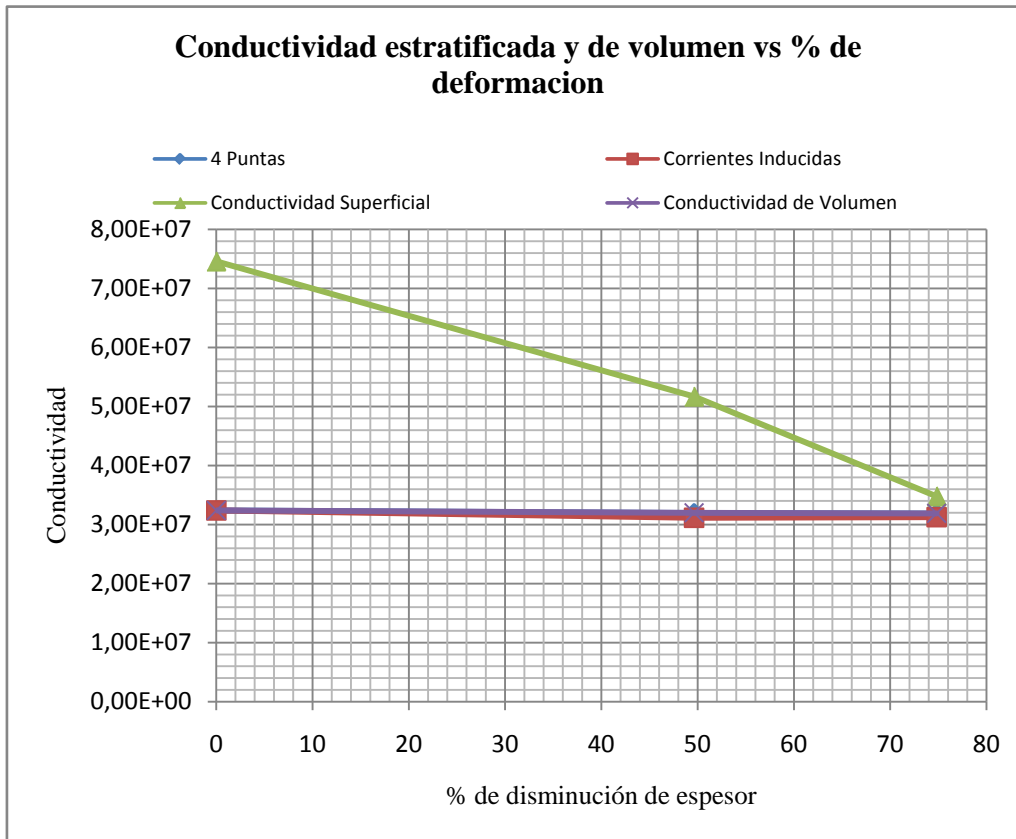
Fig. 43. Grafica Conductividad estratificada y volumétrica vs % deformación. Tomografía de impedancia.



**Tabla 15** Variación de la conductividad eléctrica (Volumétrica y estratificada) con el % de deformación

Probetas	Espesor (mm)	% de disminución	Conductividad DC	Conductividad AC	Conductividad Estratificada	Conductividad Interna
			S/m			
6T	1,523	0	3,24E+07	3,24E+07	7,46E+07	3,24E+07
5T	3,046	49,625	3,20E+07	3,12E+07	5,17E+07	3,20E+07
4T	6,047	74,820	3,19E+07	3,13E+07	3,48E+07	3,19E+07

En la tabla 15 se muestran los valores de conductividad eléctrica obtenidos después de la aplicación del algoritmo de inversión de los datos experimentales (MAPLE). En ella se comparan los valores de conductividad volumétrica correspondientes a los valores obtenidos mediante cuatro puntas, corrientes inducidas y tomografía de impedancia, y conductividad estratificada obtenida mediante este ensayo.



**Fig. 44.** Grafica de conductividad eléctrica vs % deformación mediante las 3 técnicas.

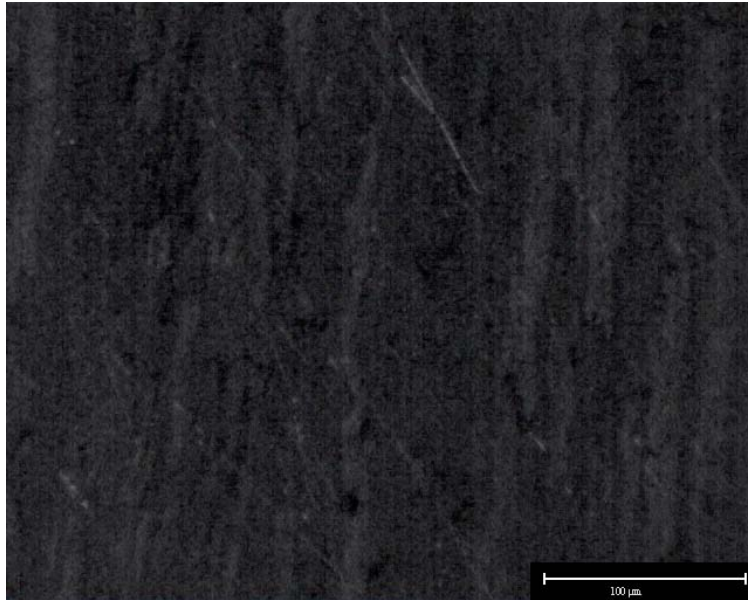
La figura 44 se puede apreciar la comparación de conductividad eléctrica mediante los 3 métodos descritos en esta investigación y la conductividad estratificada obtenida por este ensayo. En general la variación de conductividad volumétrica es atribuible a la variación de conductividad superficial, aunque se aprecia un descenso en la conductividad superficial a medida que el % de disminución aumenta. Se consigue que existe una relación entre perímetro/Área menor a 1 hasta aproximadamente el 73% de reducción de espesor y luego como se puede apreciar en la tabla 15 un aumento. Esto nos conlleva a suponer que puede existir un incremento de la contribución de la

superficie sobre el volumen en la conductividad, el cual nos puede aclarar el comportamiento inesperado de la conductividad obtenida mediante cuatro puntas.

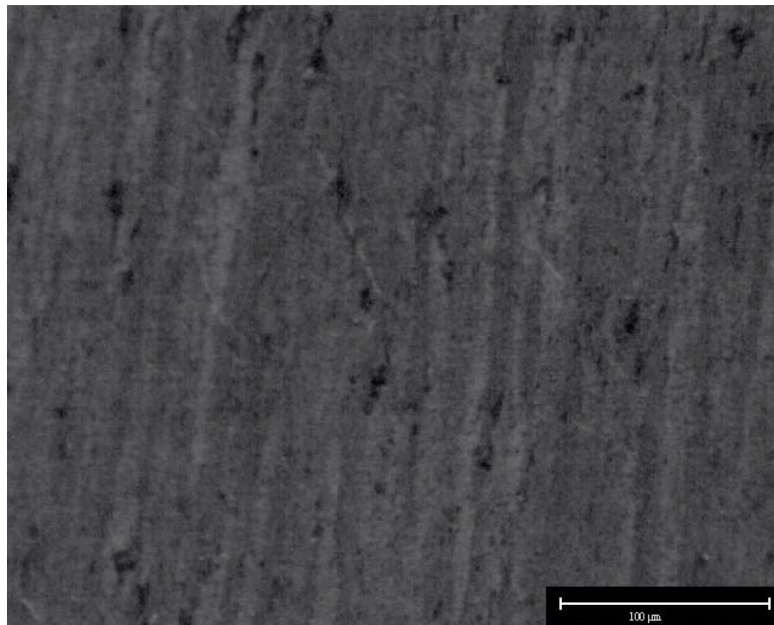
#### **4.2. Microscopia óptica.**

El estudio de la evolución microestructural de la aleación de aluminio AA8011, se realizó la técnica de microscopia óptica; las fotomicrografía fueron tomadas bajo la polarización de la luz incidente a 200x mediante la adaptación de una cámara digital para microscopio en el microdurometro. En la fotomicrografía tomada se puede observar la distribución y morfología de los granos presentes, observando un alargamiento progresivo sin que se observe indicios de recristalización.

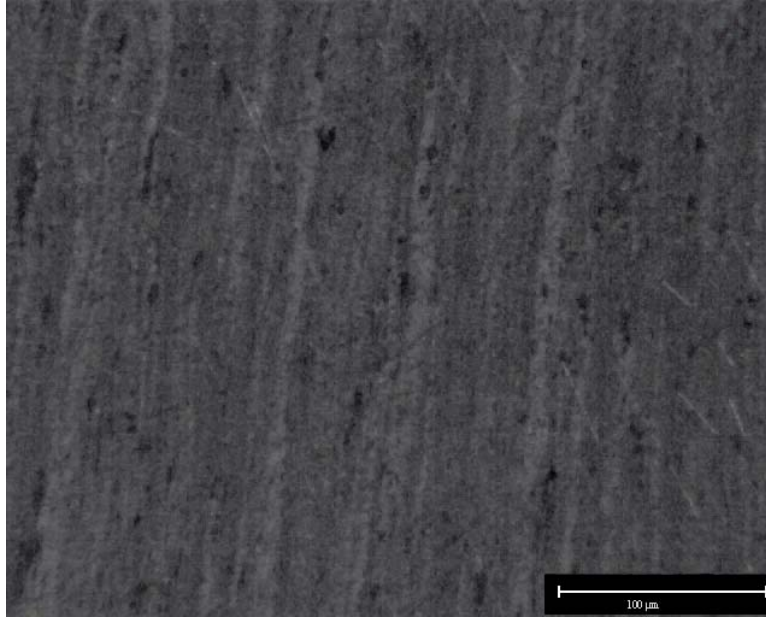
En las siguientes figuras se puede apreciar cómo evoluciona la microestructura a consecuencia de la deformación en frío a la cual están sometidas las láminas.



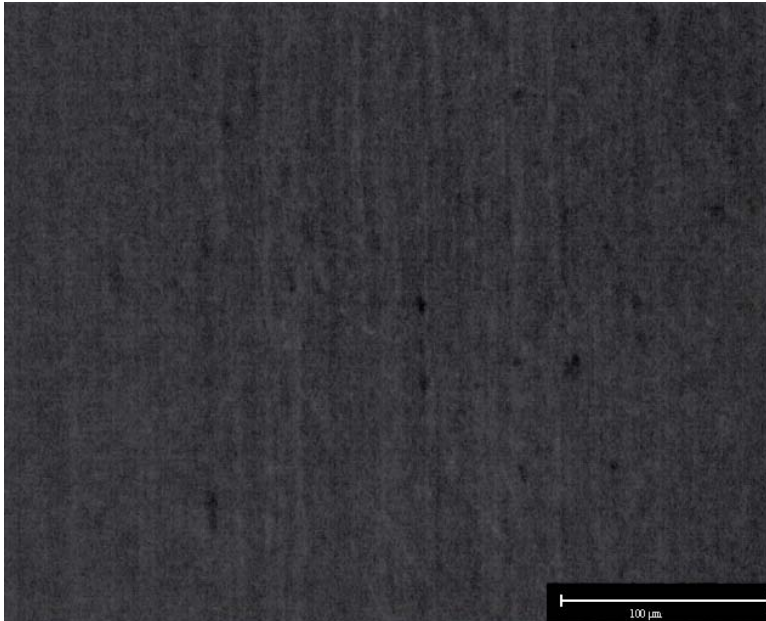
**Fig. 45.** Metalografía de la probeta 6T proveniente de colada continua.



**Fig.46.** Metalografía de la probeta 5T (49% de deformación).

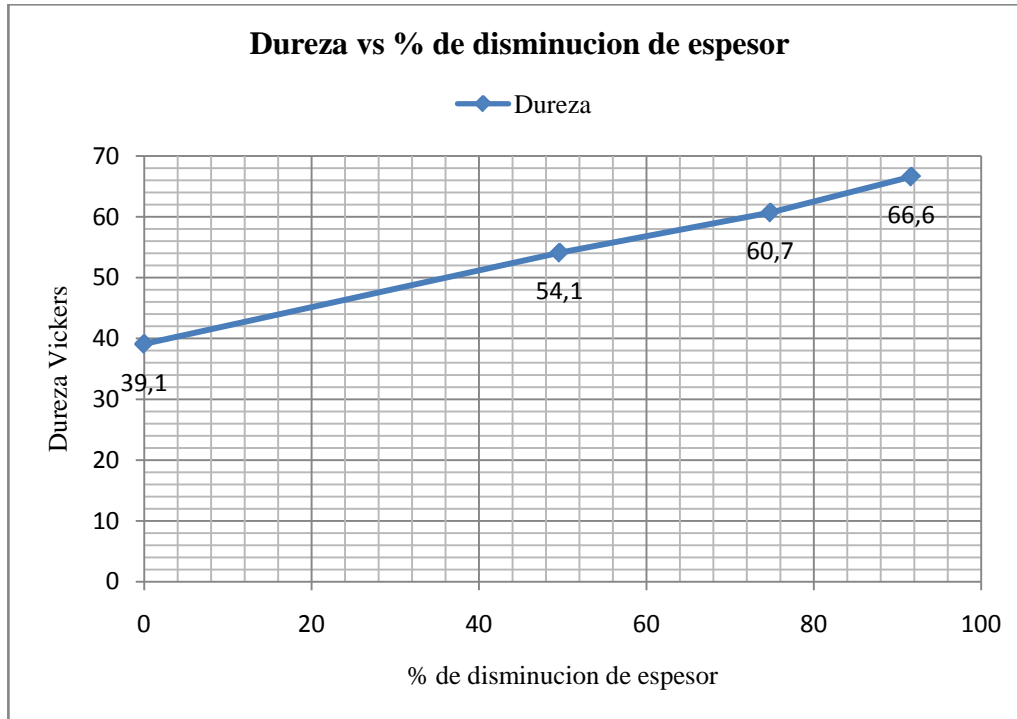


**Fig.47.** Metalografía de la probeta 4T (75% de deformación).



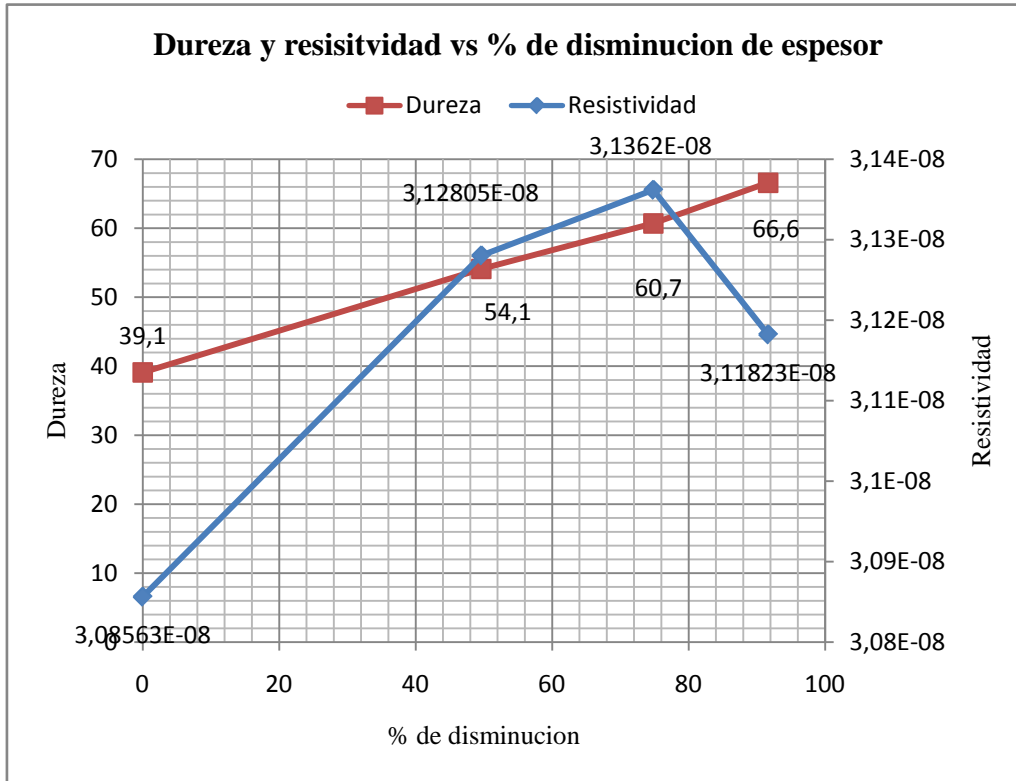
**Fig.48.** Metalografía de la probeta 3T (92% de deformación).

### 4.3. Ensayo de Microdureza.



**Fig. 49.** Grafica de Dureza vs % de disminuci3n de espesor

En la figura 49 se observa que la dureza aumenta a medida que aumenta el porcentaje de disminuci3n de espesor, lo que indica un endurecimiento de las laminas causada por la deformaci3n plástica producida en el proceso de laminaci3n. El aumento m1s notable se observa en la primera etapa de disminuci3n de espesor, en este primer intervalo la lamina de colado reduce su espesor a la mitad generando un aumento de la densidad de dislocaciones en las laminas y una gran deformaci3n en los granos, luego se observa que en cada intervalo el aumento de dureza cada vez es menor esto indica que el material se est1 acercando a su punto de saturaci3n en cual no es posible seguir deformando pl1sticamente.



**Fig. 50.** Grafica de Dureza y Resistividad vs % de deformación.

Se observa en la figura 50 que la resistividad aumenta a medida que aumenta la dureza, este comportamiento es constante hasta aproximadamente el 75% de deformación donde se observa una disminución en la resistividad y continúa el aumento en la dureza.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES**

1. La aplicación de trabajo en frío en el proceso de laminación, modifica la microestructura de la lámina de aleación de aluminio y en consecuencia, disminuye su conductividad.
2. La caracterización mediante microscopía óptica reveló, el aumento de la deformación de los granos en las láminas, así como la ausencia de recristalización.
3. Mediante el Ensayo de dureza no se pudo garantizar la ausencia de una posible recuperación.
4. En la medición de conductividad eléctrica dependiendo del espesor, la corriente puede desarrollarse principalmente en volumen o sobre superficie del espécimen. Sin embargo, en cada caso, ambas contribuciones están presentes en mayor o menor medida.
5. El método de tomografía permite obtener los valores de conductividad eléctrica en varias capas del espesor del material.
6. Se logró obtener las curvas de calibración para el método de corrientes inducidas para la aleación AA8011.



## **CAPITULO VI**

### **RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda realizar estudios en láminas mediante Microscopia Electrónica de Transmisión con el objeto de analizar la influencia de las partículas cercanas a la superficie en la conductividad estratificada.
2. Realizar los ensayos de conductividad eléctrica en laboratorios los más aislado posible de la variación en el tendido eléctrico.
3. Analizar la conductividad eléctrica mediante el método de corrientes inducidas con mayores frecuencias y distintas Bobinas.
4. Proponer estudios de la conductividad eléctrica en láminas de menor espesor y de diferentes aleaciones de aluminio.
5. Realizar estudio de conductividad eléctrica implementando el método de transmisión de corriente inducida.
6. Realizar las mediciones de conductividad variando la corriente para cada espesor, con el fin de mantener la densidad de corriente.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASM Metals Handbook. 1992 Properties and selection-non ferrous alloys and special- purpose. Volumen 2. pp. 3470.
- [2] Del Rio, J., Vandor, L. 2008 “Estudio sobre la factibilidad técnica para obtención de foil de aluminio sin aplicación de recocido intermedio”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería Mecánica.
- [3] Handbook of Aluminum, Aluminum Company of Canada LTD, Canada 1957.
- [4] Torres D., et al. 2006. “Caracterización de la aleación de aluminio AA8011 proveniente de colada continua de doble rodillo sometida a un recocido de estabilización”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería Metalúrgica.
- [5] <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/ENG/default.asp?catid=214&pageid=2144417045>
- [6] Barrand, P.,”Enciclopedia del aluminio. Grupo Pechiney, Bilbao, Editorial Urmo. pp. 670.1987. Volumen 2
- [7] Avallone E.A, Baumeister T.,”Marks Manual del Ingeniero Mecánico”. México, Editorial Mc Graw Hill.9na Edición. Tomo 2.
- [8] Barrand, P.”Enciclopedia del aluminio”. Grupo Pechiney, Bilbao, Editorial Urmo, 1987. Volumen 3
- [9] Rowe, G. W. “Conformado de los metales”. Editorial Urmo, Bilbao 1972. pp.376.
- [10] R. E. “Reed-Hill: Physical Metallurgy Principles”, Ed. D. Van Nostrand, New York.1973, pag. 246.

- [11] Avner S. H. "Introducción a la metalurgia física". Editorial McGraw Hill, 2da. Edición. México, D F. 1980. pp. 695.
- [12] Hayden H. W. et al. "Propiedades mecánicas". Editorial Limusa. Mexico 1978. pp. 253.
- [13] Gundlach, C., et al. 2003. "Direct observation of subgrain evolution during recovery of cold-rolled aluminium".
- [14] Bay, B., et al. 1984 "Recrystallization in commercially pure aluminum", Metallurgical and materials transactions A. Editorial Springer Boston. Vol 15, No 2. pp 287.
- [15] Puchi, E.S., et al. 1986. "Recristalización de la aleación comercial Al-1% Mn, durante la aplicación de secuencias múltiples de deformación en frío y recocido", Revista de Ingeniería, Editorial Proyecto Papiro, Vol 1, No. 2, pp. 101.
- [16] Villalobos, C. y Piñeiro A. 1992. "Efecto de la temperatura de Recocido en la cinética de recristalización de una aleación comercial de aluminio 8011-M", Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico. Caracas U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica
- [17] Bay, B., et al, "Initial stages of recrystallization in aluminum of commercial purity", Metallurgical and materials transactions A Editorial Springer Boston. Vol 10. No 3.1979. pp 65.
- [18] Puchi, E. S., et al. 1986 "Aspectos sobre la recristalización de la aleación comercial Al-1% Mn, Deformada bajo condiciones de trabajo en frío" .Revista de ingeniería. Editorial Proyecto Papiro, Vol. 1, No. 1, pp. 49
- [19] Verhoeven, D. "Fundamentos de metalurgia física", Editorial LIMUSA. 1987. pp. 347

- [20] Sandstrom, R., “Criteria for nucleation of recrystallisation around particles”, RISO 1. 1986. pp 45.
- [21] Sandstrom, R., “On recovery of dislocation in subgrains and subgrain coalescence”, Acta MET., 25, 1977. pp 897.
- [22] [http://www.fisicarecreativa.com/informes/infor\\_em/Metodo\\_de\\_las\\_4\\_ptas2k7.pdf](http://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_em/Metodo_de_las_4_ptas2k7.pdf)
- [23] ASTM B 193-02.” Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials” Annual Book of ASTM Standard. 2002.
- [24] Wolf Stanley, Smith Richard F. 1992 “Guía para mediciones electrónicas y prácticas de laboratorio” Prentice – Hall Hispanoamerica, S.A. México. 2da Edición.
- [25] González, C., et al, 2004. “Conductividad Macroscópica y Superficial en la recristalización de Aluminio 3003H14”. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.
- [26] Delgado D., 2008 “Estudio de conductividad eléctrica estratificada en la aleación de aluminio AA5052”, Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico. Caracas U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica.
- [27] ASM Metals. Handbook. 2004. Nondestructive Evaluation and Quality Control. Volumen 17. pp. 1608.
- [28] [http://www.ndted.org/GeneralResources/MaterialProperties/ET/ET\\_matlprop\\_Aluminum.htm](http://www.ndted.org/GeneralResources/MaterialProperties/ET/ET_matlprop_Aluminum.htm)
- [29] Carrión F.F, et al,” Evaluación no destructiva de materiales estructurales en puentes” Secretaria de comunicaciones y transporte. Instituto mexicano del transporte. Publicación técnica N° 231.

- [30] Carrión F.F, et all, "Evaluación no destructiva de materiales estructurales en puentes" Secretaria de comunicaciones y transporte. Instituto mexicano del transporte. Publicación técnica N° 231.
- [31] INTA, "Introducción a los métodos de ensayo no destructivos de control de la calidad de los materiales". 2 da Edición, Madrid, 1979.
- [32] Shakelford, J. "Introducción a la ciencia de los materiales para ingeniero". Prentice Hall. 4ta edición. Inc. 1998.
- [33] Gallipoli, A. "Cambios de resistividad en la aleación comercial de la aluminio 3003H14 durante la recristalización", tesis de maestría en física de los END. Universidad central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. 2004.
- [34] ASTM E 1004-02." Standard Practice for determining Electrical Conductivity Using Electromagnetic (Eddy- Current)" Annual Book of ASTM Standard. 2002.