

**CAMBIO DE RESISTIVIDAD EN LA ALEACION COMERCIAL
DE ALUMINIO
3003 H14 DURANTE LA RECRISTALIZACION**

Ing. Audry Evelin Gallipoli Negrín

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO A LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE MAGÍSTER SCIENTIARUM EN FÍSICA DE
LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.**

JULIO, 2004

DEDICATORIA

A ti, *José Gregorio*, la mano que me acompaña cerca, mi luz, mi guía,
mi inspiración, mis mejores momentos, mi rincón especial,
ya que sin tu presencia, palabras y auténtico sentimiento
no hubiese podido culminar este reto.

AGRADECIMIENTO

- ❖ Al Departamento de Física , de la Facultad de Ingeniería, de esta magna casa de estudios, por la colaboración brindada por su personal, en la elaboración y aplicación de los métodos escogidos en el presente Trabajo de Grado.
- ❖ A la Escuela de Metalurgia, de la Facultad de Ingeniería de la UCV, por el apoyo que me demostraron en el suministro de materiales y el permiso otorgado para ejecutar mis trabajos prácticos en sus laboratorios.
- ❖ Al Profesor Carlos González, por acceder a mi petición de convertirse en mi tutor, en todo momento me dedicó tiempo, asesoría profesional y compartió sin egoísmo sus conocimientos.
- ❖ Al profesor Freddy Fraudita, por el apoyo prestado a través de la Escuela de Metalurgia; sin duda alguna, un amigo que hice en el camino de mi vida por la UCV.
- ❖ Al profesor Luis Amorer, por estar siempre pendiente y motivarme a terminar mi Trabajo de Grado.
- ❖ Al profesor Héctor Constac, una persona que en el ámbito académico me enseñó lo que significa ser docente, ser guía, ser apoyo invaluable para nosotros los estudiantes.
- ❖ A todos los profesores del Departamento de Física Aplicada y a todo el personal administrativo de ese mismo despacho, haciendo especial agradecimiento a María Eugenia. A todos ustedes gracias por ser tan gentiles, esto realmente motiva a estudiar, superarse y estar allí.
- ❖ A Clarita y Víctor , gente especial que estuvo conmigo en las largas horas del laboratorio de la escuela de metalurgia.
- ❖ A ambos, gracias por su colaboración y todas las enseñanzas que me brindaron durante el tiempo de la preparación de muestras.
- ❖ A mis Padres, Hermanos y en especial a mi “Abue”, por estar siempre a mi lado en tiempos difíciles y en la cosecha, son ejemplo, guía, motivación, un algo especial en mi vida.
- ❖ A mi gran Amiga María Ximena, por su compañerismo y hermandad, una mujer que es sinónimo de apoyo, solidaridad y amistad de la buena.

- ❖ A “Súper Simón”, por su gran colaboración durante el transcurso de toda la carrera, por esos permisos tan necesarios, por su oído atento y su apoyo como amigo, antes jefe.
- ❖ A mis compañeros de Estudios (Félix, Brenda, Irlanda y Edda), por compartir buenos momentos durante todos estos años y darme la satisfacción de tenerlos como continuar amigos especiales, gente linda con la que te tropiezas y continuas caminando a lo largo de la vida.

Ing. Audry E. Gallipoli N.

**CAMBIO DE RESISTIVIDAD EN LA ALEACION
COMERCIAL DE ALUMINIO 3003 H14 DURANTE
LA RECRISTALIZACION**

**TUTOR: Prof. Carlos González. Tesis.
Ciudad U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Departamento de Física Aplicada. Año 2004, 100 p.**

**Palabras Claves: Resistividad, Ensayos No Destructivos, Recristalización,
Aluminio 3003H14,.**

Resumen. En el presente trabajo se determina las variaciones absolutas y relativas de resistividad en especímenes de la aleación Aluminio 3003 H14 diseñados de tal manera que las variaciones de resistividad sean pequeñas (1 -10%). Las probetas objeto de estudio fueron deformadas por laminación y preparadas mediante la aplicación de tratamiento térmico, manejando el tiempo y la temperatura de recocido para variar el grado de recristalización, a fin de conseguir variaciones en la conductividad relativa a la conductividad inicial. Igualmente se efectuaron pruebas de metalografía y ensayos de dureza para la verificación del grado de recristalización. La metodología empleada para la medición de resistividad de la corriente consistió en la aplicación del método de las cuatro puntas y métodos de ensayos no destructivos tales como método de corrientes inducidas, método de la fuerza y método de transmisión, lo cual permitió comparar los resultados experimentales obtenidos en cada uno de ellos. La calibración del equipo de Corrientes Inducidas se efectuó por comparación de las variaciones de conductividad con la temperatura, para un material de conductividad y coeficiente de temperatura conocidos. Igualmente, los otros métodos empleados consistieron, por una parte, en la medición de la fuerza entre una bobina plana impulsada por una corriente senoidal de intensidad controlada y el material ensayado, para el cual se mantienen fijos el espesor y la distancia bobina - material. En la aplicación del método de transmisión, se determina la dependencia de la fuerza electromotriz inducida en una bobina que se está al lado contrario de la probeta, en el cual se encuentra la bobina impulsora. De los distintos métodos aplicados, resalta el método de corrientes inducidas, por su facilidad y sencillez de implementación así como su posibilidad de aplicación en la industria metalúrgica. Finalmente, el comportamiento determinado experimentalmente se compara con el resultado de la simulación numérica realizada mediante la solución de las ecuaciones de Maxwell, para el caso armónico con simetría axial. Se concluye, que es posible determinar de manera no destructiva las variaciones de resistividad mediante el uso de ensayos no destructivos, en productos planos, los cuales pueden ser correlacionados con cambios en propiedades de otra índole, tales como el grado

de dureza y recristalización. El presente estudio permite ver el comportamiento Recristalización vs Resistividad en función del tiempo de recocido en aleaciones de aluminio comercial, lo cual redundará en beneficios económicos para la industria metalúrgica.

INDICE

	Pag.
VEREDICTO DEL JURADO	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
RESUMEN	VI
INDICE	VIII
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABLAS	XIV
LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS	XV
INTRODUCCION	1
1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACION	4
1.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO	4
1.1.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	4
2. MARCO TEORICO	6
2.0 ANTECEDENTES	6
2.1 ESTUDIOS DE ROSSITER Y WELL	10
2.2 ESTUDIOS DE LIUN Y LIANG	11
2.3 ESTUDIOS DE S.L. AMES Y A.D. Mc. QUILLAN	12
2.4 ESTUDIOS DE P. OLAFSSON AND R. SANDSTROM	14
2.4.1 MODELO DE RESISTIVIDAD	14
2.5 RESISTIVIDAD ELECTRICA	16
2.6 CONTROL DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	18

2.6.1 EFECTOS DE LA TEMPERATURA	18
2.6.2 EFECTOS DE LOS DEFECTOS DE RED	19
2.7 RESISTIVIDAD DEL ALUMINIO	20
2.8 RECRISTALIZACION	21
2.8.1 EFECTOS DEL TIEMPO Y TEMPERATURA	21
2.8.2 TEMPERATURA DE RECRISTALIZACION	21
2.8.3 EL TAMAÑO DEL GRANO RECRISTALIZADO ...	22
2.9 METODOS DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO	
DESTRUCTIVOS	22
2.9.1 METODO CORRIENTES INDUCIDAS	22
2.9.1.1 ECUACIONES DE MAXWELL	23
2.9.1.2 DETERMINACION DE LA ECUACIONES	
DE CAMPO	26
2.9.1.3 CONDICIONES DE FRONTERA Y	
DETERMINACION DE B	29
2.9.1.4 ECUACION PARA E EN DIFERENCIAS	
FINITAS	30
2.9.2 METODO CUATRO PUNTAS	31
2.9.3 METODO DE LA FUERZA	33
2.9.3.1 MODELACION DE LA FUERZA ENTRE	
LA BOBINA Y LA PROBETA	34
2.9.4 METODO DE TRANSMISION	36
2.9.4.1 MODELACION PARA EL METODO DE	
TRANSMISION	36

2.10 INCERTIDUMBRE	37
2.12.1 ERROR vs. INCERTIDUMBRE	38
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	40
3.1 DESARROLLO DE LA INVESTIGACION	40
3.2 EQUIPOS UTILIZADOS EN EL PRESENTE ESTUDIO	42
3.3 PREPARACION DE LAS PROBETAS	42
3.3.1 LAMINACION	42
3.3.2 CORTE	43
3.3.3 RECOCIDO DEL PRIMER GRUPO PROBETAS ..	44
3.3.3 APLICACION ENSAYOS DE DUREZA (VICKERS)	46
3.3.4 TECNICA METALOGRAFICA APLICADA A	
MUESTRAS DE 10 mm. X 10 mm.	46
3.3.4.1 PREPARACION DE LAS MUESTRAS	46
3.3.5 MICROSCOPIA OPTICA	47
3.3.6 MEDICION DE LA FRACCION VOLUMETRICA	
RECRISTALIZADA	47
3.3.7 PREPARACION SEGUNDO GRUPO PROBETAS ...	48
3.4 PREPARACION PARA LA APLICACION DE LOS	
METODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	49
3.4.1 METODO DE LAS CUATRO PUNTAS	49
3.4.2 METODO DE CORRIENTES INDUCIDAS	52
3.4.3 METODO DE LA FUERZA	54
3.4.4 METODO DE LA TRANSMISION	56

3.5 PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DE INCERTIDUMBRE	58
4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACION	60
4.0 ENSAYOS DE DUREZA	60
4.1 SELECCION DE LA TEMPERATURA IDEAL DE TRABAJO	61
4.2 TRATAMIENTO TERMICO DEL SEGUNDO GRUPO DE PROBETAS	62
4.3 RESULTADO DE LA FRACCION RECRISTALIZADA	63
4.4 FOTOMICROGRAFIAS	65
4.5 RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO DE LAS CUATRO PUNTAS	68
4.6 RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO DE CORRIENTES INDUCIDAS	78
4.7 RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO DE LA FUERZA	83
4.8 RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO DE TRANSMISION	84
4.9 COMPARACION DE RESULTADOS OBTENIDOS	86
4.10 RESULTADOS DE LOS CALCULOS DE INCERTIDUMBRE	88
5. DISCUSION DE LOS RESULTADOS	89
6. CONCLUSIONES	91

7.	RECOMENDACIONES	94
8.	BIBLIOGRAFIA	95
9.	APENDICES	97
	9.1 NORMATIVAS ESTABLECIDAS POR LA ASTM B193-87	
	PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD CD	97

LISTA DE FIGURAS:

	Pag.
Fig. 1	11
Fig. 2	13
Fig. 3	19
Fig. 4	20
Fig. 5	32
Fig. 6	32
Fig. 7	41
Fig. 8	43
Fig. 9	49
Fig. 10	50
Fig. 11	51
Fig. 12	52
Fig. 13	53
Fig. 14	56
Fig. 15	56
Fig. 16	57
Fig. 17	58
Fig. 18	53
Fig. 19	65
Fig. 20	66
Fig. 21	66
Fig. 22	66
Fig. 23	67
Fig. 24	67
Fig. 25	68
Fig. 26	68

Fig. 27	Microfotografía Optica N°9. Aumento 50x . Probeta N° 65. Muestra rescristalizada al 100%	69
Fig. 28	Grafica Resistividad vs. % de Recristalización de las Probetas de Aluminio 3003, aplicando el Método de las 4 Puntas.....	75
Fig. 29	Grafica. Variación de la conductividad con el porcentaje de recristalización para probetas homologadas mediante deformación en frío	76
Fig. 30	Grafica. Variación de resistividad	77
Fig. 31	Grafica. Variación relativa de la resistividad en función del porcentaje de recristalización	78
Fig. 32	Grafica. Valor absoluto de las divisiones del equipo para láminas de aluminio.....	80
Fig. 33	Determinación de la respuesta del instrumento de diagrama de impedancia (CI) con la variación de temperatura.	81
Fig. 34	Grafica. Métodos de Corrientes Inducidas. Variación de resistividad Vs. % Recristalización	82
Fig. 35	Grafica. Métodos de Corrientes Inducidas. Variación Relativa de resistividad Vs. % Recristalización	82
Fig. 36	Grafica. Método de la Fuerza. Conductividad Vs. Recristalización	83
Fig. 37	Grafica. Método de la Fuerza. Variación relativa de corriente Vs. variación relativa de conductividad	84
Fig. 38	Grafica. Método de Transmisión. Dependencia relativa entre fem inducida en la bobina secundaria con la variación relativa de conductividad de la probeta	85
Fig. 39	Grafica. Variaciones Relativas de fem Vs. Conductividad.....	86
Fig. 40	Grafica. Resultado de la determinación de la resistividad de las probetas ensayadas mediante el método de cuatro puntas y mediante corrientes inducidas, para los diferentes porcentajes de recristalización	88

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla N° 1 Medidas de las probetas objeto de estudio	43
Tabla N° 2 Tratamiento de muestras	44
Tabla N° 3 Mediciones de dureza (Vickers)	60
Tabla N° 4 Tratamiento nuevo grupo de probetas	63
Tabla N° 5 Porcentaje Recristalización vs. Tiempo Recocido	64
Tabla N° 6 Mediciones de resistividad sobre las probetas sin recocer ..	69
Tabla N° 7 Mediciones de resistividad sobre las probetas recocidas	72
Tabla N° 8 Variación relativa de la resistividad (M4P)	77
Tabla N° 9 Diferentes medidas cuadrícula osciloscopio	79
Tabla N° 10 Valores por cada División/Temperatura	79
Tabla N° 11 Valores variación relativa de la resistividad. Método Corriente Inducidas.....	81
Tabla N° 12 Valores Conductividad Vs. Recristalización. Método de la Fuerza.....	83
Tabla N° 13 Valores % Recristalización Vs. Tensión (mV). Método Transmisión	85
Tabla N° 14 Valores % Recristalización Vs. % Conductividad Teórica. Método Transmisión.....	86
Tabla N° 15 Valores Promedios para Cálculo de Incertidumbre	88

1.- INTRODUCCION:

Para la industria metalúrgica es de gran importancia la medición de conductividad eléctrica y en particular para las aleaciones de aluminio, debido al uso extensivo de estas, como conductores, eléctricos o térmicos, en líneas de potencia e intercambiadores de calor, respectivamente. Para esas aplicaciones, las aleaciones de aluminio son atractivas debido a su alta resistencia mecánicas y buena conductividad eléctrica y sus buenas propiedades anticorrosivas, así como por su baja densidad. La medición de la conductividad eléctrica también es importante en aplicaciones estructurales, debido a que pequeños cambios en esta pueden implicar variaciones de las propiedades mecánicas.

Una de las características más importantes del aluminio es su maquinabilidad y su capacidad de trabajo; se puede fundir mediante cualquier método conocido, puede ser laminado a un espesor deseado, puede ser estampado, estirado, forjado y extruido a casi cualquier forma imaginable.

La resistividad eléctrica es un indicador de la existencia de mecanismos a micro escala, responsables de los cambios en la estructura interna, que ocurren en las aleaciones durante el tratamiento térmico. La resistividad, es por consiguiente, una propiedad esencial del material para aplicaciones industriales, así como también, para propósitos investigativos.

El cambio en la resistividad eléctrica es también consecuencia de la perturbación de la periodicidad atómica en una estructura cristalina, por ejemplo, disturbios en la periodicidad por las vibraciones propias de la agitación térmica, defectos en la estructura cristalina tales como intersticios, dislocaciones o límites de grano, o la sustitución de átomos impuros en sitios de la red del metal puro.

El metal puro, en general tiene menor resistividad que las aleaciones binarias diluidas y crece la dependencia de forma casi lineal para la adición de pequeñas cantidades de aleantes.

El objeto de este trabajo consistió en aplicar algunos procedimientos destructivos y no destructivos para determinar los cambios de resistividad que ocurre cuando se varía el grado de recristalización en materiales que han pasado por procesos de laminación y recocido. La metodología empleada para medir la resistividad consistió en la aplicación de métodos no destructivos tales como método de corrientes inducidas, método de transmisión y el método de la fuerza y métodos destructivos como el método de las cuatro puntas. Los resultados obtenidos por estos métodos se correlacionaron con los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metalografía óptica cuantitativa para medir grado de recristalización. Los cambios de conductividad DC y los cambios correspondientes a CA, se verificaron para las frecuencias del orden de 1khz a 200 khz.

Los resultados obtenidos permiten establecer la validez de métodos no destructivos, para la determinación de resistividad AC, su correlación con

la conductividad AC; la posibilidad de establecer procedimientos para obtener especímenes con pequeños cambios en su conductividad. Así mismo, se puede verificar la variación de la resistividad a medida que incrementa el grado de recristalización después de someterse el material a un proceso de recocido.

CAPITULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1- OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.1.1- OBJETIVO GENERAL:

Determinar variaciones absolutas y relativas de resistividad en especímenes de la aleación de Aluminio 3003 H14 diseñados de tal manera que las variaciones de resistividad sean pequeñas (1 -10%).

1.1.2- OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Revisión y recopilación de material bibliográfico con el fin de determinar el avance en las investigaciones referido al tema de trabajo.
- Preparación de las probetas de acuerdo a la normativa establecida por la American Society For Testing and Materials, designación B 193-87, para la medición de la resistividad eléctrica en materiales conductores.
- Selección de la temperatura de estudio mediante pruebas de dureza (Vickers) a las probetas seleccionadas.

EL PROBLEMA DE INVESTIGACION

- Recocido de probetas a temperatura de estudio para la aplicación de los métodos de ensayo destructivos y no destructivo y metalografía óptica cuantitativa.
- Desarrollar la evaluación del método destructivo y no destructivo para la medición de pequeñas variaciones de conductividad AC y DC en probetas generadas para tal fin.
- Analizar los resultados obtenidos.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.0 ANTECEDENTES

La medición de Resistividad Eléctrica “ ρ ” se ha convertido en un método potencial para la investigación de diferentes cambios en las aleaciones. Es bien conocido que el proceso de dispersión de electrones es altamente sensible a los detalles micro estructurales. Típicamente, en el proceso de recocido, en los procesos de precipitación o envejecimiento en los fenómenos de corto y largo alcance y en los cambios de fase, se llevan a cabo investigaciones usando los métodos de medición de resistividad. Recientemente se han realizado investigaciones, intentando explicar el comportamiento anormal de la resistividad durante las etapas iniciales del envejecimiento isotérmico de las aleaciones de aluminio, en las cuales agrupaciones de átomos segregados llamadas Zonas de Precipitación o Zonas de Guiner Preston (GP) se han formado. Estas Zonas GP se forman a bajas temperaturas, debido a que se requieren poca energía de activación para su formación.

En las mediciones de resistencia de valores muy bajos (1Ω hasta 0.00001Ω) se utiliza el puente de Kelvin, empleándose por ello el método de las cuatro puntas. Adicionalmente, también se utilizan equipos de Corrientes Inducidas con diagrama de impedancia, para la determinación del

MARCO TEORICO

cambio de conductividad CA, así como también el métodos de la fuerza y el método de transmisión.

De acuerdo con la Ley de Ohm, basándose en el modelo microscópico de un conductor, es posible entender el comportamiento lineal del mismo.

En un material por el que pasa una corriente constante, la velocidad de arrastre es constante y, por lo tanto, la fuerza total sobre todas las partículas debe ser cero. Sin embargo, puede actuar otras fuerzas a demás de la fuerza eléctrica, que son debidas al medio.

Para tener una idea de la trayectoria libre media de los electrones en un metal, tendremos que considerar la dinámica de las colisiones de los electrones. Donde el conductor es electrostáticamente neutro sólo en promedio, hay grandes variaciones en el potencial a distancias del orden de un (1) Angstrom, y una partícula cargada, como un electrón, deberá chocar y dispersarse por variaciones de potencial. La conductividad finita de los metales proviene de las imperfecciones en la red cristalina. Estas imperfecciones son de dos (2) tipos: impurezas o imperfecciones en su forma geométrica (límite de grano, dislocaciones en materiales policristalinos), e imperfecciones térmicas inducidas que provienen del movimiento térmico de los átomos en la estructura. Ambos tipos de imperfecciones, contribuyen independientemente a la resistividad.

La conductividad eléctrica es una magnitud recíproca de la resistividad eléctrica y se determina por la ecuación. $\sigma = 1 / \rho$

MARCO TEORICO

La medida de la conductividad eléctrica (σ) y las características metalúrgicas que la afectan tales como: impurezas, elementos de aleantes, la microestructura, el tamaño de grano, etc., facilitan la realización de los siguientes controles: Pureza de metales no aleados, clasificación de aleaciones, verificar el estado de deformación, el tipo de tratamiento aplicado, la dureza, el tamaño de grano, determinación de la profundidad de capas endurecidas, por cementación y temple superficial o de la descarburación superficial en aceros, nitruración y carbonitruración, medidas de espesores de un recubrimiento metálico, basándose en las diferencias de conductividad entre el recubrimiento y el metal base.

La profundidad de penetración " δ " de las corrientes inducidas es función de las características físicas de la muestra (conductividad eléctrica σ y permeabilidad magnética relativa " μ_r ") y de la frecuencia del ensayo " f ". En la elección de la frecuencia de ensayo, habrá que conjugar, el poder de resolución adecuado para el material estudiado, tomando en cuenta el espesor de la probeta y la resolución del equipo.

$$\delta = [2 / \mu \sigma \omega]^{1/2}$$

En lo que respecta a los palpadores utilizados en equipos de corrientes inducidas, se encuentran palpadores con uno o más solenoides (primarios y secundarios), cuyos ejes son perpendiculares a la superficie de la muestra, de manera que la corriente que pasa por las espiras sea paralela a la superficie de dichas muestras. Los palpadores se pueden clasificar por

MARCO TEORICO

su construcción interna, en dos tipos: Palpadores que proporcionan un campo de corriente inducidas concentrados, y Palpadores que proporcionan un campo de corrientes inducidas no concentrado. Las diferencias de constitución interna entre ambos tipos de palpadores radican principalmente en lo siguiente:

- a) Los de campos concentrados están constituidos por unos solenoides de diámetro reducido y un núcleo de ferrita: (mezcla sinterizada de óxido de hierro y otros óxidos), de elevada permeabilidad magnética y,
- b) Los de campo no concentrado, por un solenoide de diámetro grande y núcleo de aire.

Existen palpadores terminados en sección plana y circular o en punta semiesférica. Los de la sección plana y circular se aplican para medidas de conductividad eléctrica.

Algunos autores han realizado investigaciones en materiales utilizando mediciones de resistividad, como: Rossiter y Well, Liu y liang y S.L Ames y Mc Quillan. A continuación se resumen las contribuciones fundamentales de estos autores al tema que nos ocupa y se indican las referencias correspondientes.

2.1- ROSSITER Y WELL ⁽¹⁾ Ellos estudiaron el comportamiento de la resistividad eléctrica de una aleación binaria durante las precipitación. Observaron que el máximo en resistividad que aparece durante el envejecimiento ocurre cuando las dimensiones lineales de los agrupamientos es comparable con el camino libre medio del electrón de conducción.

Las predicciones cualitativas están acordes con las observaciones experimentales en los casos de agrupaciones lineales, planares y esféricas, o sea, donde considera que estos agrupamientos aumentan con los procesos de nucleación y crecimiento.

Ellos señalan que algunas aleaciones en los procesos de endurecimiento por envejecimiento, pasan a través de etapas de pre-precipitación de las zonas de Guinier-Preston. Si estas aleaciones son templadas desde la región de una sola fase, del diagrama de equilibrio y subsecuentemente envejecidos a temperatura dentro del campo de dos fases, la resistencia eléctrica aumenta cuando se forman las zonas G-P y aumenta alcanzando un máximo y entonces cae a un valor constante.

Los experimentos de difracción de rayos X y electrones, han demostrado que durante este proceso de precipitación, las dimensiones lineales de las zonas "GP" aumentan monotónicamente hasta un tamaño particular y luego permanecen constante (Murakam, Kawano y Murakami 1969).

Esta etapa final corresponde a la resistividad aproximándose a un valor constante como se demuestra en el siguiente figura.

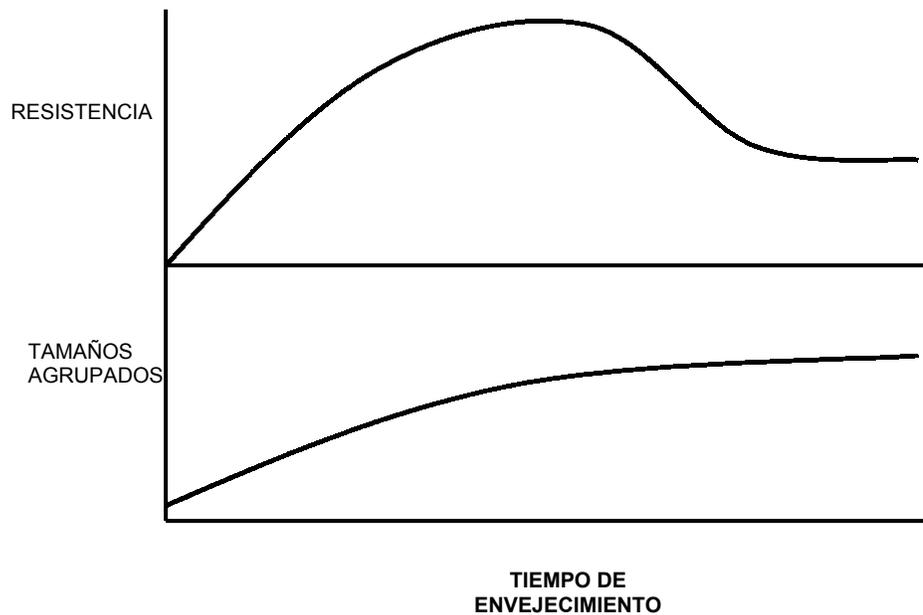


FIGURA N° 1. DIAGRAMA REPRESENTATIVO DE LA RESISTENCIA Y TAMAÑOS AGRUPADOS EN FUNCION DEL ENVEJECIMIENTO

2.2- LIU Y LIANG ⁽²⁾ Han medido el comportamiento de la resistividad como función de la porosidad en níquel de alta porosidad y los resultados fueron comparados con modelos teóricos y empíricos. Se encontró que los nuevos modelos basados sobre propiedades estructurales ajustan adecuadamente los datos experimentales. Esto provee una conveniente forma de medir la resistividad en la producción de metales porosos y así mejorar la fabricación de electrodos porosos.

2.3 S.L. AMES Y A.D. Mc. QUILLAN⁽³⁾ Estos investigadores estudiaron el efecto de elementos aleantes en la resistividad eléctrica del titanio metálico. Determinaron la forma de la curva resistividad – temperatura de la fase Alfa (α) del titanio hexagonal compacto a diversas temperaturas. De 20 °C hasta aproximadamente 400 °C, la resistividad del titanio resulto ser una función lineal de la temperatura, como es de esperarse en un metal puro a una temperatura superior a la temperatura de Debye del material.

Por encima de los 400 °C sin embargo, la tasa de cambio de la resistividad “ ρ ” con la temperatura “ T ” disminuye progresivamente cuando la temperatura de transformación alotrópica (882,5 °C) fue alcanzada. Esto puede ser visto en la figura No.2. en la Curva Resistividad/Temperatura para el titanio.

La cantidad de $d\rho/dT$ cae desde 178×10^{-9} Ohm/ °C a 400 °C. A un valor muy bajo inmediatamente por debajo de la temperatura de transformación alfa beta ($\alpha - \beta$), es decir, se observa una desviación de la linealidad a altas temperaturas y para valores altos de $d\rho/dT$ a temperatura ambiente.

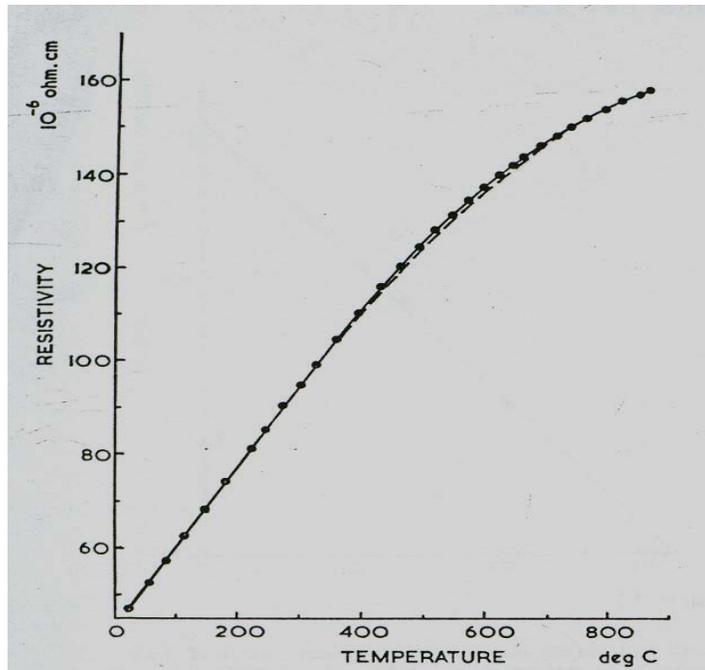


FIGURA N° 2. CURVA DE RESISTIVIDAD/TEMPERATURA DE TITANIO α .

La línea punteada representa la curva del mejor ajuste usando una ecuación de la forma:

$$\rho = a + bT - pe^{-q/T}$$

Donde a,b, p y q son constantes para cualquier aleación particular en el rango de temperatura considerada en la investigación de ellos. Ellos predicen que es muy probable que este tipo de relación pueda ser igualmente válida para aleaciones de titanio-aluminio y titanio-estaño con concentraciones mayores al 5%.

2.4- P. Ólafsson and R. Sandstrom ⁽⁴⁾. Estudiaron el cálculo de resistividad eléctrica para aleaciones Al-Cu y Al-Mg-Si.

Para calcular la resistividad, tiene que ser determinada la cantidad de elementos en la solución sólida.

La solubilidad de equilibrio puede ser determinada de los diagramas de fase de equilibrio, pero generalmente, las aleaciones comerciales no están en estado de equilibrio. Durante el envejecimiento, alguno de los elementos de la aleación precipita desde la solución sobre saturadas formando dispersoides o precipitados. El grado de precipitación depende principalmente de la temperatura y del tiempo de ocurrencia. Los autores han desarrollado un modelo de resistividad basado en la regla de Matthiessen, aplicando el programa TERMO-CALC, para extrapolar y evaluar un modelo de resistividad eléctrica de las aleaciones de Al-Cu y Al-Mg-Si.

2.4.1- MODELO DE RESISTIVIDAD: Si una aleación se disuelve suficientemente, se puede considerar que el electrón de conducción puede interactuar solamente con una impureza o un fonon en un instante cualquiera y la resistividad de la aleación se puede entonces expresar como la suma de estos dos términos de acuerdo a la regla de Matthiessen para soluciones diluidas.

$$\rho (T, C_1, \dots, C_n) = \rho_p (T) + \rho_{res} (C_1, \dots, C_n) .$$

Donde $\rho_p(T)$ es la resistividad dependiente de la temperatura del metal (La contribución de resistividad de el electrón y el fotón disperso) y ρ_{res} (C_1, \dots, C_n) es la contribución de resistividad de los elementos aleantes con concentración C_i . Asumiendo la aditividad de la contribución de diferentes elementos aleantes a la resistividad total, y tomando en consideración los elementos precipitados, la ecuación anterior puede escribirse como:

$$\rho(T, C_1, C_n) = \rho_p(T) + \sum C_i P_i + \sum C_k P_k$$

Donde C_i y C_k son las concentraciones en peso (Wt %) del elemento "i" en la solución y del elemento "K" fuera de la solución, donde $i, k=1 \dots n$

En conclusión, la resistividad de las aleaciones comerciales de Al-Cu y Al-Mg-Si fueron calculadas usando la regla de Matthiessen y un modelo desarrollado por los autores. Un sistema para cálculos termodinámicos (Thermo-calc) fue usado para derivar la solubilidad de los elementos aleantes.

La resistividad fue calculada usando la temperatura de equilibrio de 300 °C, 420 °C y 460 °C para recocido, envejecimientos artificial y envejecimiento natural, respectivamente.

Para las aleaciones Al-Cu la resistividad observada con respecto a una calculada, concuerda aproximadamente $\pm 2 \text{ n}\Omega\text{m}$, excepto para envejecimiento natural de cuatro aleaciones estudiadas y de dos aleaciones con composición especial. La resistividad calculada está dentro de $\pm 2 \text{ n}\Omega\text{m}$ con respecto a la resistividad observada para las series Al-Mg-Si, excepto para tres aleaciones conteniendo cromo y una conteniendo Boro, donde la resistividad observada es más alta. La desviación para las aleaciones conteniendo cromo aumenta con el contenido de Mg.

2.5- RESISTIVIDAD ELECTRICA.

Si se pasa una corriente eléctrica de “I” amperios por un objeto, y el potencial se reduce “V” voltios, la resistencia eléctrica “R” del objeto se calcula por la Ley de OHM.

$$R = V / I$$

La resistencia “R” es la característica del tamaño, forma y propiedades de los materiales que componen el circuito. Si este objeto posee una longitud “L” y sección transversal “A”,

$$R = \rho L/A$$

Donde “ ρ ” es la resistividad eléctrica, se mide la resistividad eléctrica para medir la corriente “ I ” y la diferencia de la potencia “ V ”;

$$\rho = G V / I$$

Donde G es el factor geométrico que depende de la forma del objeto.

La conductividad eléctrica es una magnitud recíproca de la resistividad eléctrica y se determina por la ecuación:

$$\rho = 1/\sigma$$

El recíproco de la conductividad se llama Resistividad “ ρ ”

La unidad de ρ en el sistema mks es volt metro/ampere o ohm metro donde el ohm (Ω) se define por:

$$1 \text{ Ohm} = 1 \text{ Volt} / 1 \text{ ampere.}$$

La unidad de conductividad σ es $\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$

El transporte de la electricidad en un metal (corriente eléctrica) se realiza por los electrones. Admitiendo que la conductividad eléctrica se debe a la circulación de los electrones en el metal, ésta, por consiguiente, se encuentra en relación con el número de “Electrones Libres” y con una 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.

2.6- Control de la Conductividad Eléctrica.

La conductividad eléctrica de un metal libre de defectos es determinada por la estructura electrónica de los átomos. Pero la conductividad eléctrica puede verse afectada significativamente por la interferencia de la movilidad de los electrones. La movilidad es proporcional a la velocidad de la corriente V , la cual es baja si los electrones chocan con imperfecciones de la red. El camino libre medio es la distancia promedio entre colisiones, en consecuencia, un largo camino medio libre, permite altas movilidades y alta conductividad.

2.6.1- Efecto de la Temperatura en la Conductividad Eléctrica:

Cuando la temperatura de un metal incrementa, la energía térmica causa que los átomos vibren. Estos se observan en la figura N° 3 . En algún instante, los átomos no pueden estar en su posición de equilibrio y entonces interaccionan y dispersan los electrones. En el camino libre medio, la movilidad de los electrones es reducida, y la resistividad eléctrica incrementa.

A muy bajas temperaturas la agitación térmica de los átomos alrededor de lo nodo de la red se hace mínimo; los trenes de onda de los electrones se

desplazan por consiguiente en una red perfecta y su encuentro con los átomos engendra ondas difusas que refuerzan la onda inicial, dada la coherencia de la red. El haz incidente se propaga entonces sin sufrir debilitamiento y la resistividad eléctrica de un metal exento de toda impureza y perfectamente recristalizado tiende a cero en la proximidad del cero absoluto.

2.6.2- Efectos de los Defectos de la Red: Las irregularidades como átomos extraños, dislocaciones, nodos reticulares, vacancias y límites de granos, también provocan aumentos de la resistividad eléctrica del metal.

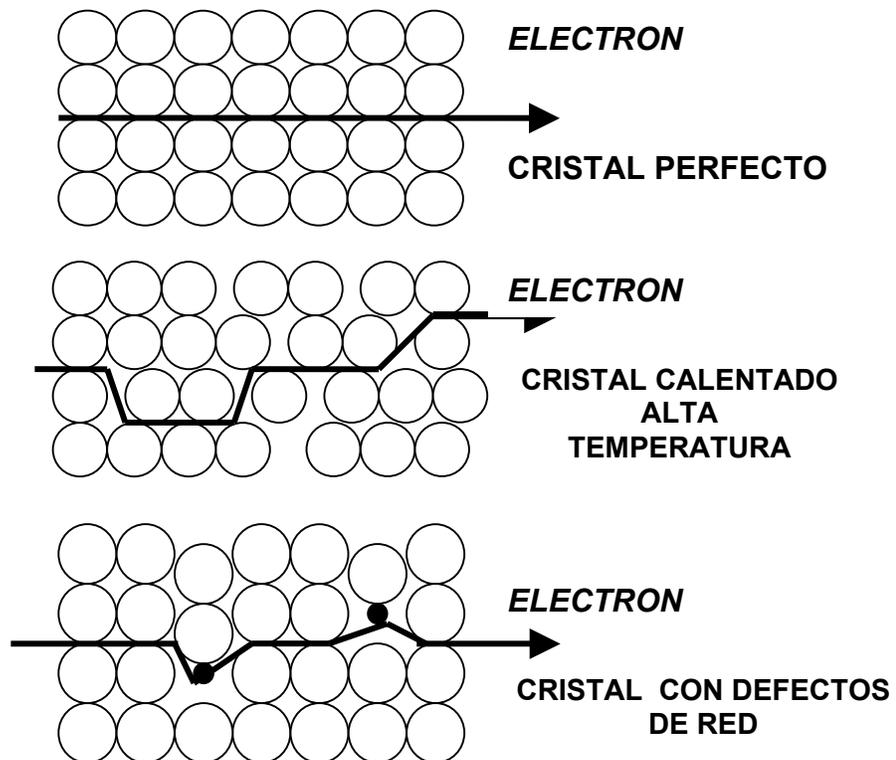


FIGURA N° 3. EFECTOS SOBRE EL ELECTRON AL PASO POR LA DISTINTAS FORMACIONES DE RED

2.7- Resistividad del Aluminio.

Se han realizado mediciones de conductividad eléctrica **INTA**⁽⁷⁾ que indican que el efecto de la deformación sobre la conductividad eléctrica del aluminio es muy débil. En la figura N° 4 se aprecia la variación de la conductividad eléctrica de un aluminio comercial (99,5% Al) con la acritud. Entre el estado de recocido y el estado de acritud, correspondiente a una reducción del 75% en el espesor, la pérdida de conductividad es tan solo de 0,465 m/ohm. mm²

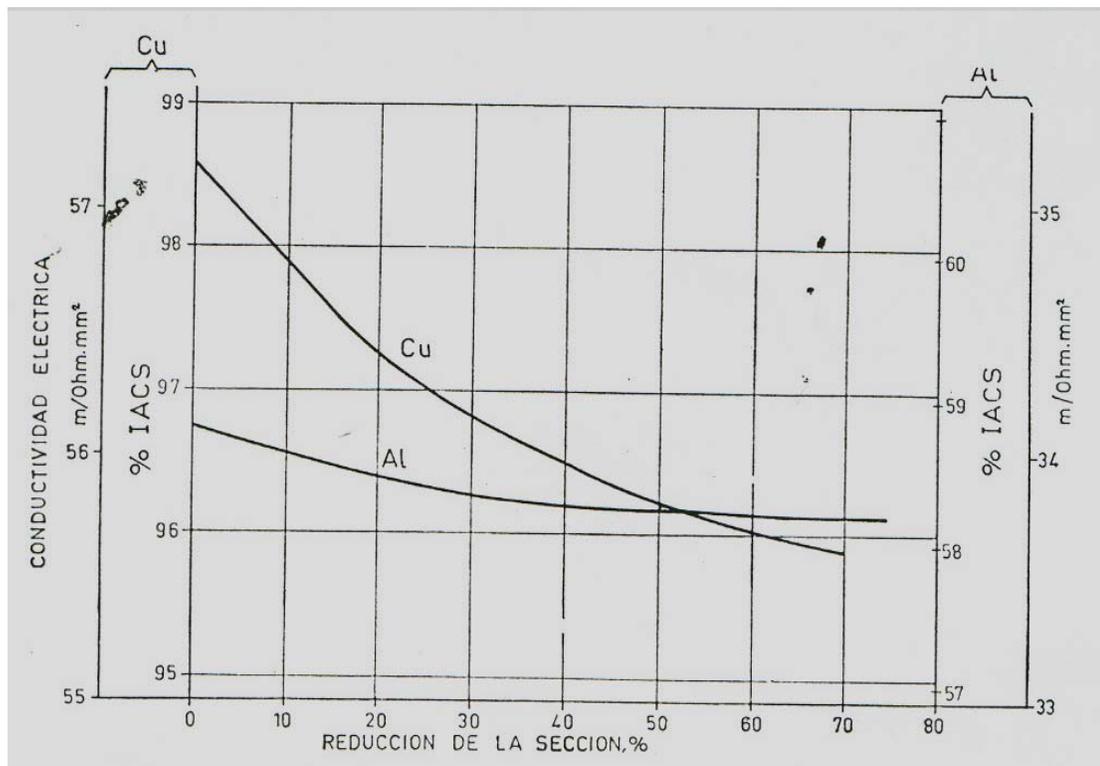


FIGURA N° 4. VARIACION DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DEL Cu Y DEL Al CON LA ACRTUD (INTA)

2.8- RECRISTALIZACIÓN:

En el estudio de los procesos de deformación de los metales, existe una consideración especial en relación con el fenómeno de recristalización, ya que éste es un proceso que produce ablandamiento en el metal previamente deformado, facilitando las deformaciones en los procesos de conformado que se realicen posteriormente, con la finalidad de obtener piezas útiles.

La recristalización involucra un amplio espectro de cambios microestructurales que ocurren durante el recocido de un metal o aleación, y consiste específicamente en el reemplazo de la estructura de grano de una fase por otros granos de la misma fase que tienen menor energía.

La recristalización que ocurre durante un recocido isotérmico comienza lentamente y llega a una velocidad de reacción máxima, después de la cual termina lentamente. Algunas consideraciones a tener en cuenta en el proceso de recristalización son:

2.8.1- Efecto del Tiempo y la Temperatura en la Recristalización: a temperaturas más elevadas, más corto será el tiempo necesario para alcanzar la recristalización total del material.

2.8.2- Temperatura de Recristalización: La temperatura a la cual un metal en particular con una cantidad determinada de deformación en frío recristalizará completamente en un período de tiempo finito, usualmente del orden de una hora⁽⁸⁾.

2.8.3- El Tamaño del Grano Recristalizado: Es el tamaño de cristal inmediatamente al final de la recristalización, esto es, antes de que haya tenido oportunidad de ocurrir el crecimiento de grano (los límites de grano pueden coalescer y crecer si se deja recociendo mas del tiempo debido). El tamaño de grano recristalizado depende de la cantidad de deformación dada a las probetas antes del recocido. Esto conduce al concepto de la cantidad crítica de trabajo en frío, la cual puede definirse como la cantidad mínima de deformación que permite a la probeta recristalizar (dentro de un período de tiempo razonable).

2.9- METODOS DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS:

2.9.1- METODO DE CORRIENTE INDUCIDAS (NO DESTRUCTIVO)

El método de corriente inducidas consiste en la detección del campo electromagnético resultante al inducir corrientes en un material conductor. Las corrientes son inducidas generalmente mediante una bobina conectada a un oscilador, mientras que el campo detectado, también mediante bobinas o mediante dispositivos basados en el efecto Hall, es interpretado por comparación con el resultado obtenido en un material de referencia. Las aplicaciones convencionales, o aquellas donde no se introduce el concepto de inversión numérica, comprenden tanto las situaciones armónicas estacionarias, como el estudio de estados transitorios, con la finalidad de

obtener información sobre las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales ensayados, o bien determinar aspectos de importancia en materiales para usos estructurales donde la geometría, así como la presencia de grietas, inclusiones o de esfuerzos residuales, son de vital importancia.

2.9.1.1- ECUACIONES DE MAXWELL: El punto de partida en la comprensión de estos métodos lo constituyen las ecuaciones de Maxwell, limitadas en este trabajo a situaciones armónicas cuasi-estacionarias (bajas frecuencias) en materiales ohmicos isotrópicos, homogéneos y de permeabilidad magnética $\mu \approx \mu_0$. “Es importante destacar que la deformación en frío introduce una anisotropía, esto compromete el concepto de conductividad, (y su medición), ya que la misma ya no sería un escalar”.

Consideremos una onda plana monocromática que incide perpendicularmente a la superficie de un conductor. Si el material es isotropico y homogéneo es posible determinar la dependencia del campo electromagnético dentro del conductor, con la distancia a la superficie, como veremos a continuación.

Dadas las ecuaciones de Maxwell ^(15,16).

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{J} \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (4)$$

Y considerando validas las relaciones constitutivas: $D = \epsilon E$, $J = \sigma E$, $B = \mu H$ y que además dentro del conductor se supone que $\sigma/\omega \gg \epsilon$, donde ω es la frecuencia en el caso de dependencia temporal armónica cuasi estacionaria, se justifica despreciar en la ecuación (2) la derivada temporal del campo \mathbf{D} . De la ecuación (1) y tomando rotor de (2) y haciendo $\partial D / \partial t = 0$, tenemos que:

$B =$ campo magnético	$E =$ campo eléctrico
$\mu =$ permeabilidad magnética	$J =$ densidad de corriente
$H =$ Intensidad del campo magnético	$t =$ tiempo
$\sigma =$ densidad de superficie de carga	$\rho =$ densidad volumétrica
$A =$ vector potencial magnético	

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{B} = -\mu\sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5)$$

Aplicando rotor nuevamente y utilizando la ecuación (2) de nuevo, se tiene que

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{J} = -\mu\sigma \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} \quad (6)$$

utilizando la identidad vectorial

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{C}) = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{C}) - \Delta \vec{C} \quad (7)$$

Se determinan de (4) y (5) las siguientes ecuaciones:

$$\Delta \vec{B} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\Delta \vec{J} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} \quad (9)$$

Sea un semi-espacio conductor cuya superficie coincide con $Z = 0$. Si el campo B solo depende de Z y además es armónico en el tiempo, la ecuación (8) la escribimos en la forma

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial Z^2} + K^2 \vec{B} = 0 \quad (10)$$

donde

$$K = (i \mu \sigma \omega)^{1/2} \quad (11)$$

Como B tiende a cero cuando Z tiende a infinito, estableciendo que el valor de su amplitud en $Z=0$ es B_0 , (10) admite la solución.

$$\vec{B}(z,t) = B_0 e^{-z/\delta + i(z/\delta - \omega t)} \quad (12)$$

En donde

$$\delta = [2 / \mu \sigma \omega]^{1/2} \quad (13)$$

Con una expresión similar para $J(z,t)$.

El parámetro δ es conocido como profundidad estándar de penetración, e indica el orden de magnitud de la profundidad de la capa donde es más significativa la presencia de corrientes inducidas. También se observa que la fase del campo varía linealmente con la profundidad. Esto da una base para la interpretación del corrimiento de fase asociado a la presencia de discontinuidades a cierta profundidad dentro del conductor.

2.9.1.2- Determinación de las Ecuaciones para el Campo.

Para la resolución del problema directo, se hará uso del calibre de Coulomb⁽¹⁷⁾, es decir, buscamos resolver el problema directo para régimen armónico cuasi estacionario, lo cual significa que la dependencia temporal de los campos es de la forma $e^{i(\omega t + \phi)}$, y demás frecuencias pequeñas ($\omega \gg \sigma/\epsilon$). Esta última condición se cumple particularmente bien en los conductores metálicos a temperatura ambiente, donde la conductividad se puede considerar independiente de la frecuencia hasta el orden de frecuencias correspondientes al infrarrojo⁽¹⁸⁾. El corrimiento de fase ϕ , se determina con respecto a la corriente aplicada a la bobina excitadora, y depende para cada campo, en el problema estudiado, de la posición espacial.

Las condiciones de fronteras para campos armónicos en el tiempo, en el estado estacionario, están dadas por⁽¹⁹⁾:

$$\hat{n} \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0 \quad (14)$$

$$\hat{n} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = 0 \quad (15)$$

$$\hat{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = 0 \quad (16)$$

$$\hat{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (17)$$

las cuales son válidas bajo la suposición de que no haya fuentes en la interfase. Esta suposición se justifica, en el caso de la ecuación (15) debido al carácter finito del segundo miembro de la ecuación (2). La continuidad de la componente tangencial del campo magnético H_t (aceptando como válida la relación (15)) implica la continuidad de la componente normal del rotor de H , donde:

$$[\nabla \times H(r,t)]_n = [\sigma E(r,t) + \varepsilon \partial E(r,t) / \partial t]_n \quad (18)$$

Considerando que la densidad volumétrica de carga es nula ($\rho = 0$), se tiene que el potencial escalar también es nulo ($\phi = 0$), luego, introduciendo el valor potencial magnético A definido mediante:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (19)$$

De la (1) tenemos:

$$\vec{E} = - \partial \vec{A} / \partial t \quad (20)$$

Con lo cual, de (2) y (13) tenemos:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} / \mu = \vec{J} + \partial \vec{D} / \partial t \quad (21)$$

En esta ecuación el último término no es relevante a la frecuencia de trabajo dentro del conductor, pudiendo también ser despreciado. Por lo tanto, la ecuación a utilizar es la ecuación de difusión:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} / \mu = \vec{J} \quad (22)$$

La densidad de la corriente J se puede escribir como la suma de la corriente inducida más la corriente de la fuente es decir:

$$\vec{J} = \vec{J}_i + \vec{J}_s \quad (23)$$

$$\vec{J}_i = \sigma \frac{\partial A}{\partial t}$$

Utilizando la expresión (13) y (23) en (22) queda

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu \sigma \vec{E} + \mu \vec{J}_s \quad (24)$$

derivando respecto al tiempo, utilizando (20) y el hecho de que derivar con respecto a t equivale a multiplicar por $i\omega$, se obtiene que

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu \sigma i\omega \vec{E} + \mu i\omega \vec{J}_s \quad (25)$$

En vista de que la corriente fuente solo tiene componente tangencial, al igual que E , al aplicar los operadores vectoriales en coordenadas cilíndricas queda:

$$\left[\frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \rho^2} - \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial E}{\partial \rho} \right] = -\mu \sigma i\omega E - \mu i\omega J_s \quad (26)$$

En caso de no despreciar la derivada temporal del vector D , habría que sumar al lado derecho de esta ecuación el término $\mu \sigma i\omega^2 E$. Esta aproximación se justifica debido a los valores numéricos de los coeficientes de la ecuación (26). A continuación tenemos los valores típicos de los

parámetros de la ecuación (26). ρ = radio, ω = frecuencia, $\mu = \mu_0 = 4 \pi \times 10^{-2}$,
 $h = \delta/5$ parámetro de la red.

2.9.1.3- Condiciones de Frontera y Determinación de \vec{B}

Consideremos las relaciones (14) en donde n es el valor normal orientado hacia fuera (del medio 1 al medio 2). Se supone además que no hay fuentes en la interfase. Dada la simetría de la fuente y de la probeta, como se mencionó arriba, en el caso estudiado, el campo eléctrico E sólo tiene componente en la dirección de θ , por lo tanto la primera ecuación en (14) indica que el mismo es continuo (E siempre es normal a n). Para el campo magnético B , tenemos que éste también es continuo como consecuencia de la continuidad de E para este caso, como se muestra a continuación.

Una vez determinado el campo E , dada la simetría y la dependencia temporal, el campo B queda determinado de la siguiente manera.

$$\vec{E} = - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -i\omega \vec{A} \quad (27)$$

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} \quad (28)$$

Luego

$$\nabla \times \vec{E} = -i\omega \vec{B} \quad (29)$$

Desarrollando el rotor en coordenadas cilíndricas, tenemos que:

$$B_{\rho} = -i/\omega \partial E_{\phi} / \partial z \quad (30)$$

$$B_z = i/\omega [E_{\phi} / \rho + \partial E_{\phi} / \partial \rho] \quad (31)$$

2.9.1.4- Ecuación para E en Diferencias Finitas

La ecuación (31) en diferencias finitas se determina introduciendo variables discretas y reemplazando las derivadas por las siguientes expresiones:

$$\partial E / \partial z^2 = 1/h^2 [E_{\rho,z+1} - 2 E_{\rho,z} + E_{\rho,z-1}] \quad (32)$$

$$\partial E / \partial \rho = [E_{\rho,z+1} - E_{\rho-1,z}] / 2h \quad (33)$$

Estas ecuaciones corresponde a la aproximación de diferencia central en el método numérico de diferencias finitas en donde ρ y z ahora representan variables discretas y h es el parámetro de la red cuadrada de discretización espacial. Con estos cambios, la ecuación (26) queda:

$$E_{\rho,z+1} - 4 E_{\rho,z} + E_{\rho,z-1} + E_{\rho+1,z} + E_{\rho-1,z} + h/2\rho E_{\rho,z-1} - h/2\rho E_{\rho-1,z} - h^2 E_{\rho,z} [1/\rho^2 + i\omega\mu\sigma_{\rho,z}] = i h^2 \mu \omega J_{\rho,z}^s \quad (34)$$

En donde J^s representa la densidad de corriente de la fuente.

Separando las partes real e imaginarias de la ecuación (34), se obtiene las siguientes expresiones, en las cuales los índices discretos ρ, z son

reemplazados por j, i respectivamente, para facilitar la utilización de estas ecuaciones en programas de computación.

$$h^2 \mu \omega \sigma_{j,i} E_{j,i}^l - 4 E_{j,i}^R + E_{j,i+1}^R + E_{j,i-1}^R + (1 + h/2\rho) E_{j+1,i}^R + (1 - h/2\rho) E_{j-1,i}^R = -h^2 \mu \omega J_{j,i}^l$$

$$-h^2 \mu \omega \sigma_{j,i} E_{j,i}^R - 4 E_{j,i}^l + E_{j,i+1}^l + E_{j,i-1}^l + (1 + h/2\rho) E_{j+1,i}^l + (1 - h/2\rho) E_{j-1,i}^l = -h^2 \mu \omega J_{j,i}^R$$

En estas ecuaciones los supraíndices “R” e “l” denotan respectivamente la parte real y la imaginaria del campo \mathbf{E} y de la densidad de la corriente (de la Fuente) \mathbf{J} . Los Subíndices j, i representan respectivamente las variables discretas en las direcciones de ρ y z .

La solución numérica de esta ecuación se realizará mas adelante para compararla con los resultados experimentales.

2.9.2- METODO CUATRO PUNTAS (METODO DESTRUCTIVO):

El método de las “Cuatro Puntas” ha demostrado ser una herramienta conveniente para las medidas de resistividad eléctrica. Una descripción del método ha sido planteada por L. Valdes, el cual muestra una relación funcional entre la resistividad eléctrica ρ , el voltaje y la corriente determinada para varias geometrías.

Una relación similar es necesaria para la evaluación de resistividades eléctricas de láminas de varias formas. Al examinar, mediante una lámina, el

ensayo de las cuatro puntas, las dos puntas extremas representan el dipolo (corriente) y las dos puntas internas miden la diferencia de potencial, como se observa en la figura N° 5:

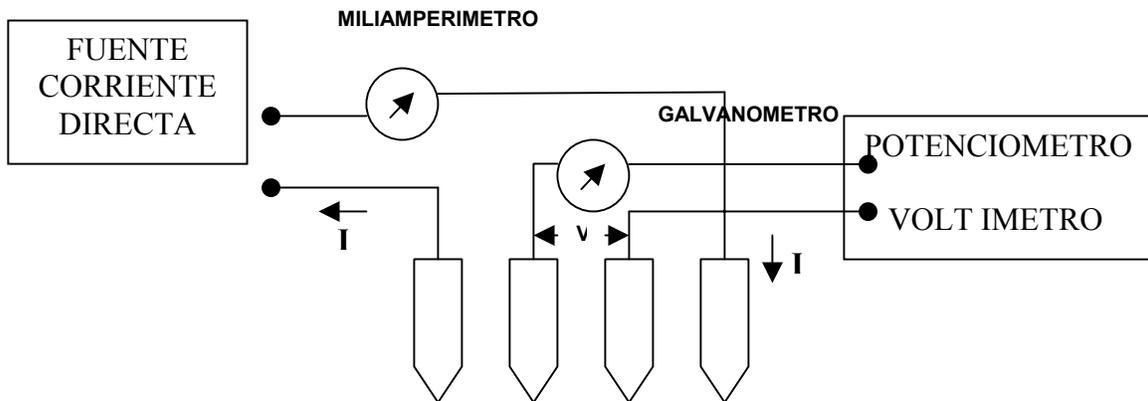


FIGURA N° 5. CIRCUITO USADO PARA MEDIDAS DE RESISTIVIDAD ELECTRICA

Para medir en una probeta rectangular con dimensiones a y d , para realizar el ensayo de las cuatro puntas, estas puntas (electrodos) se encuentran espaciados simétricamente, como se ilustra en la Figura N° 6:

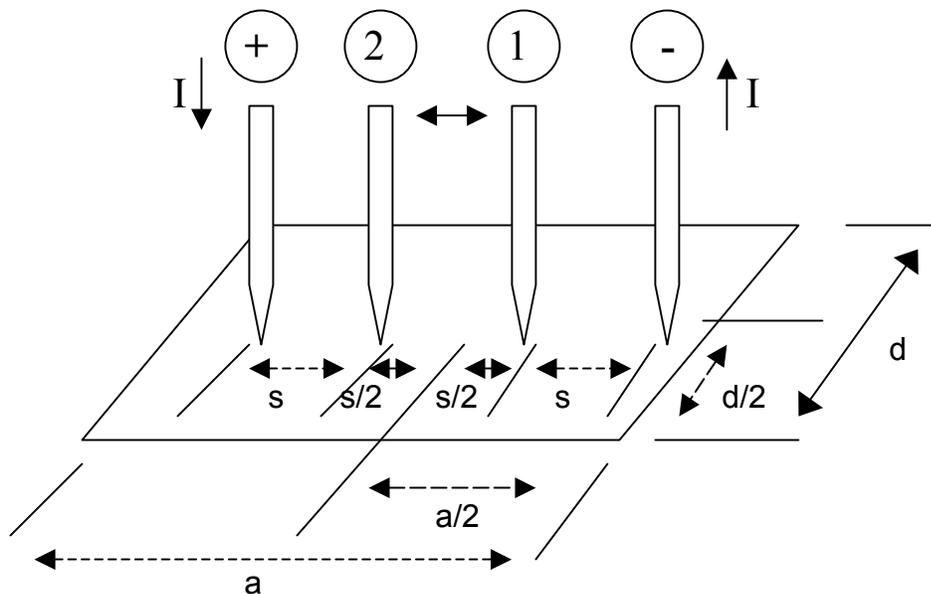


FIGURA N° 6 COLOCACION DEL ENSAYO DE LAS CUATRO PUNTAS SOBRE UNA MUESTRA RECTANGULAR

2.9.3- METODO DE LA FUERZA (NO DESTRUCTIVO) :

Mediante este método se determina experimentalmente la fuerza entre una probeta plana y una bobina circular colocada a una distancia dada de la probeta. La bobina se dispone con su eje normal a la probeta. La fuerza de interacción para una corriente senoidal es repulsiva para la frecuencia empleada. La medición de la fuerza se realizó utilizando una balanza analítica de brazos iguales, ya que para este instrumento la deflexión del fiel guarda una relación geométrica lineal (para pequeñas deflexiones) con la distancia recorrida por los platillos en la balanza.

El montaje experimental consiste en la colocación de la probeta sobre un platillo plástico de una balanza de brazos idénticos, de tal manera que la superficie de la probeta quede horizontal. Sobre la parte central de la probeta se coloca la bobina sujeta a un soporte fijo, el cual mediante un tornillo permite ajustar la distancia entre la bobina y la probeta, hasta que la misma tenga un valor inicial predeterminado, para la balanza equilibrada en ausencia de fuerza electromagnética. La corriente en la bobina es aumentada hasta que la distancia alcanza el valor establecido para la medición de la fuerza, la cual se determina mediante el desplazamiento del fiel de la balanza. Como ya se indicó, el desplazamiento del fiel, guarda relación con la distancia entre la bobina y la probeta, con lo cual se puede determinar la dependencia de la fuerza con la distancia de separación, o con otras variables del ensayo como conductividad, espesor de la probeta, frecuencia e intensidad de corriente.

2.9.3.1- MODELACIÓN DE LA FUERZA ENTRE LA BOBINA Y LA PROBETA:

La Modelación de la fuerza entre la bobina y la probeta se realiza mediante la solución numérica del problema descrito posteriormente. La fuerza de interacción sobre una espira circular paralela a la probeta, la cual es impulsada por una corriente senoidal, se determina mediante la fuerza de Lorentz

$$\vec{dF} = \vec{B} \times d\vec{l} I$$

donde $d\vec{l}$ es el elemento de línea de la espira, por un vector unitario tangencial y en el sentido de la intensidad de corriente "I" en la misma. Dada la simetría del problema, recordando que el campo B solo tiene componentes en la dirección de z y de r, se tiene que la componente de la fuerza en la dirección z está dada por:

$$F_z = \int B_r I dl$$

El campo B tiene parte real y parte imaginaria, mientras que I es real, ya que ésta es la referencia de fase. Por otra parte, el método propuesto experimentalmente refleja el valor medio de la fuerza, por lo tanto, se tiene que promediar la fuerza en el tiempo. Al integrar a lo largo de la longitud de la circunferencia y tomar la parte real de la fuerza y promediar en el tiempo, se obtiene .

$$\langle F \rangle = \pi R I B_{r0} \cos \phi$$

donde $\langle F \rangle$ es la fuerza media, R es el radio de la espira, B_{r0} es la amplitud de la componente radial de \mathbf{B} y φ es el ángulo de fase entre la corriente I y el campo \mathbf{B} . Para el ángulo de fase se tiene la relación.

$$\cos\varphi = B_{rRE} / B_{r0}$$

donde \vec{B}_{rRE} es la componente real de \vec{B}_r . Por lo tanto, la fuerza promedio se puede expresar como

$$\langle F \rangle = \pi R I B_{rRE}$$

De la ecuación en coordenadas cilíndricas, para dependencia armónica en el tiempo, se obtiene que

$$B_r = -\frac{i}{\omega} \frac{\partial E_\theta}{\partial z}$$

de donde se obtiene que

$$B_{rRE} = \frac{1}{\omega} \frac{\partial E_{\theta IM}}{\partial z}$$

Finalmente se obtiene que la fuerza promedio está dada por

$$\langle F \rangle = \frac{\pi R I}{\omega} \frac{\partial E_{\theta IM}}{\partial z}$$

lo cual se obtiene fácilmente a partir de la solución de la ecuación (12).

$$B_{(z,t)} = B_0 e^{-z/\delta + i(z/\delta - \omega t)}$$

En este trabajo se determina la dependencia de la fuerza de interacción entre la probeta y la bobina para variaciones relativas de la conductividad del orden del 10% alrededor del valor de conductividad para las probetas normalizadas del material utilizado. La comparación entre resultados experimentales y teórica indica que la variación de la fuerza de interacción es poco sensible a los cambios de conductividad considerados.

2.9.4- METODO DE TRANSMISION (NO DESTRUCTIVO) :

Este método consiste en disponer dos bobinas circulares coaxiales, separadas por una lámina del material a ensayar. Una de las bobinas es la impulsora, mientras que la otra se utiliza como detectora. Manteniendo la geometría invariable, se colocan las diversas probetas correspondientes a los diversos niveles de recristalización. Para corriente impulsora, geometría y frecuencia fijas, se determina la fuerza electromotriz (*fem*) inducida en la bobina secundaria.

2.9.4.1- MODELACIÓN PARA EL MÉTODO DE TRANSMISIÓN

La fem inducida en una espira secundaria o detectora es igual a la componente del campo eléctrico E_{θ} , integrado a lo largo de la longitud de la circunferencia. Para una bobina se superpone la fuerza electromotriz de

cada espira, de acuerdo a la ubicación espacial que esta tenga. De esta manera tenemos que la amplitud “V” de la fuerza electromotriz inducida en una espira de corriente de radio “R”, está dada por,

$$V = 2\pi R E_{\theta}(r, z) \Big|_{\substack{r=R \\ z=d}}$$

el campo se evalúa para $r = R$ y $z = d$, donde d es la separación entre la espira y la superficie de la probeta.

2.10- INCERTIDUMBRE

En la mayoría de las situaciones no se tiene un valor convencionalmente verdadero contra el cual comparar el resultado de la medición. El operario que controla un producto en una línea de fabricación, el ingeniero que evalúa las propiedades de un material, no disponen, en ese momento, de una medida previa de mejor calidad de la misma magnitud, que les permita comparar y evaluar su resultado. Es en este tipo de circunstancias, la incertidumbre constituye el parámetro más apropiado para evaluar la calidad de la medida.

La incertidumbre es un parámetro que establece un intervalo alrededor del resultado de medición, de los valores que también podrían haberse obtenido durante la medición, con cierta probabilidad. En la determinación de la incertidumbre deben tenerse en cuenta todas las fuentes de variación que puedan afectar significativamente a la medida.

Incertidumbre Relativa: Es comparar la incertidumbre de un resultado contra el resultado mismo. , la cual para una variable X, se define por:

$$\text{Incertidumbre relativa} = \Delta x / x$$

Donde Δx es la incertidumbre y x es el resultado de la medición.

2.10.1- Error Vs. Incertidumbre:

Es frecuente encontrar documentos y textos donde se trata al error y a la incertidumbre como sinónimos. Sin embargo, la **Comunidad Metrológica Internacional (VIM)**, establece una clara diferencia entre ambos conceptos.

Error: se aplica este concepto cuando se conoce previamente un valor convencionalmente verdadero. Algunas situaciones típicas donde se conoce de antemano un valor convencionalmente verdadero de la magnitud por medir, este es el correspondiente a un resultado obtenido por un sistema de medición más sofisticado o refinados que aquello de los que uno dispone en un momento dado, este se puede encontrar en tablas de textos, reportes científicos, etc.

$$\text{ERROR} = \text{Resultado de la medición} - \text{Valor verdadero}$$

La incertidumbre se puede evaluar por dos métodos, el tipo A y tipo B.

El tipo "A": Es el basado en cualquier método estadístico válido para tratamientos de datos, típicamente se usa la Desviación Estándar de una

serie de mediciones independientes como estimativo de la incertidumbre de un resultado.

El tipo “B”: Se basa en el juicio científico que hace uso de toda la información relevante disponible. Está puede incluir:

- Datos previos de medición
- Experiencia o conocimiento general por parte de quien realiza la medida, del comportamiento y las propiedades de los materiales e instrumentos relevantes.
- Especificaciones del fabricante.
- Datos proporcionados por reportes de calibración u otro tipo de reporte.
- Incertidumbre de los datos de referencia que traen los manuales.

CAPITULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 - DESARROLLO DE LA INVESTIGACION:

La investigación científica se ejecuto bajo el desarrollo del procedimiento experimental especificado en el figura N° 7. Cabe destacar que para el cumplimiento de las distintas etapas se necesito la disponibilidad de los equipos y materiales ubicados tanto en el Laboratorio de Métodos Electromagnéticos del Departamento de Física Aplicada, como en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, ambas de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V. El material objeto de estudio, aleación comercial de Aluminio 3003 H14, fue suministrado por el Centro de Tecnología del Aluminio (CITALA) de la Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

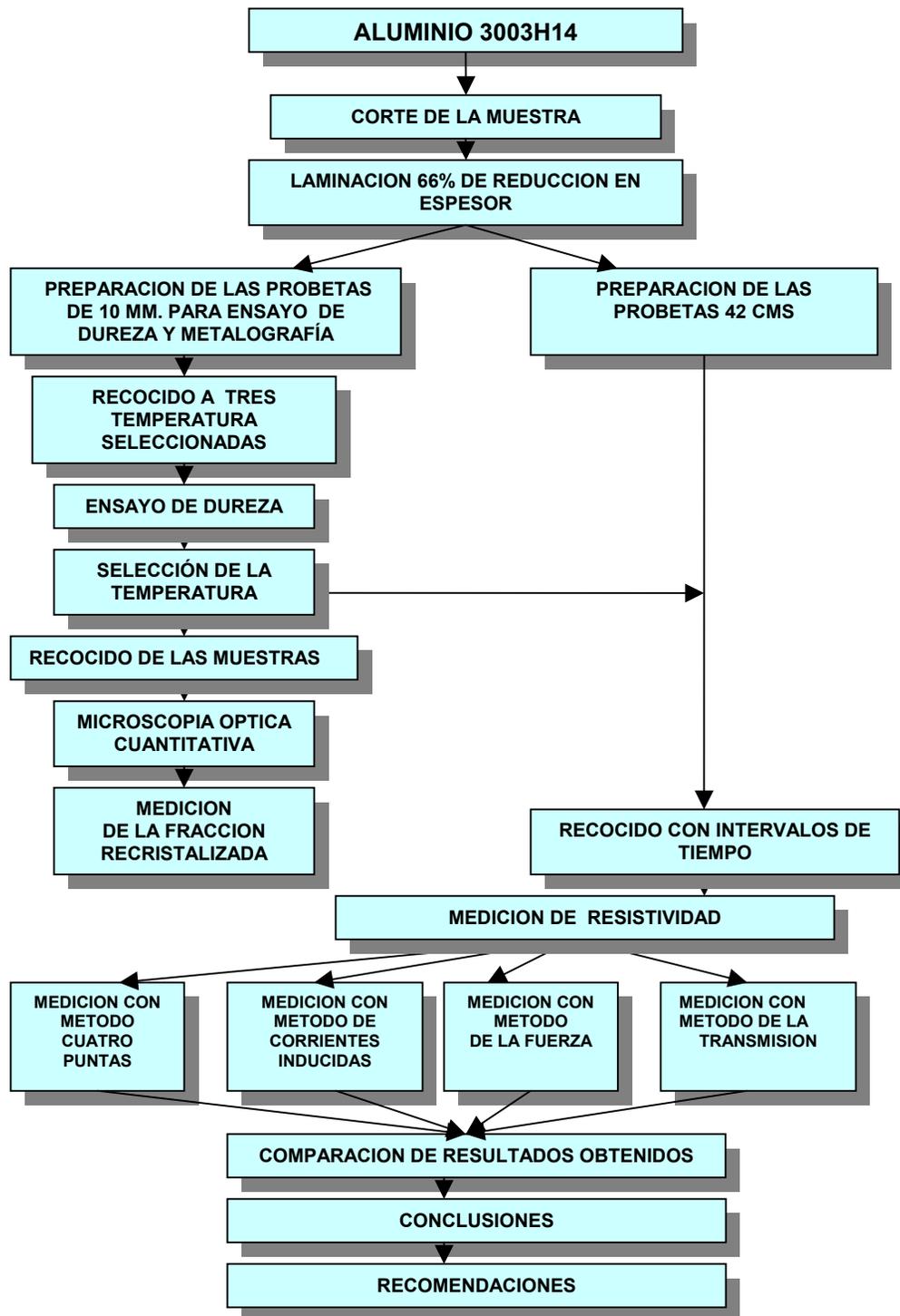


FIGURA 7. ESQUEMA DE LAS ETAPAS DE ESTUDIO

3.2- EQUIPOS UTILIZADOS DURANTE EL PRESENTE ESTUDIO

- 1.- Horno eléctrico de Mufla Thermolyne Furnatrol III, Modelo: F-A1740.
- 2.- Laminadora
- 3.- Cortadora de metal.
- 4.- Multímetro HP, DC o AC, modelo (para medir Amperios)
- 5.- Condensador de 40.000 micro faradios
- 6.- Fuente de poder (0.20 V – 0.25 V), modelo Ley Bold-Heraeus.
- 7.- Multímetro HP, DC o AC, modelo 34401A (para medir voltios)
- 8.- Equipo de corrientes Inducidas (Magnaflux ED 810).
- 9.- Medidor de Dureza (Vickers)
- 10.- Equipo de Metalografía.

3.3- PREPARACION DE LAS PROBETAS DE ALUMINIO:**3.3.1- LAMINACION:**

Para la elaboración de las probetas objeto de estudio, inicialmente se procedió a deformar la muestra completa de la aleación de aluminio 3003 H14, laminándola desde 6,35 mm. hasta 2,20 mm. de su espesor original y 42 cms de longitud final (66% de reducción de espesor), por ser esta medida acorde con los parámetros requeridos para la aplicación de los métodos de ensayo no destructivos, en especial el correspondiente al método de cuatro puntas, según la Norma ASTM B-193.

3.3.2- CORTE:

Para llevar a cabo el estudio de la recristalización y las mediciones de resistividad, se procedió a cortar en frío, las muestras anteriormente laminadas, en dos grupos con las siguientes dimensiones (Ver figura N° 8):

TABLA N° 1. MEDIDAS DE LAS PROBETAS OBJETO DE ESTUDIO

MEDIDAS	ANCHO	LARGO	ESPESOR
1ER. GRUPO	10 mm	10 mm	2,2 mm.
2DO. GRUPO	32 mm	420 mm	2,2 mm.

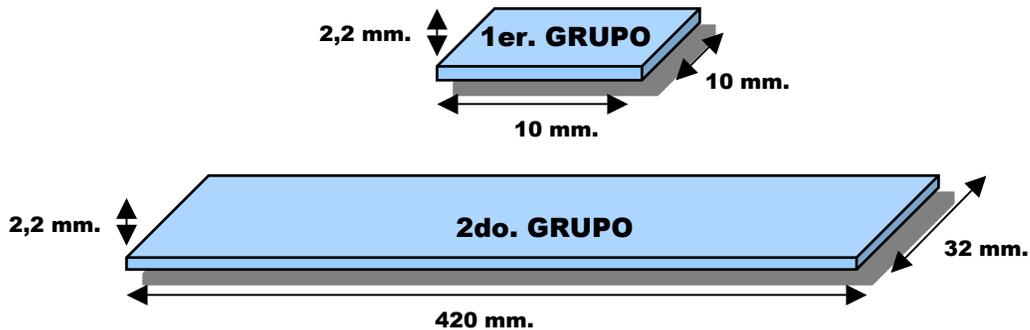


FIGURA N° 8. Medidas Representativas de las Probetas Objeto de Estudio

Al primer grupo de muestras le fueron realizado ensayo de dureza VICKERS y microscopía óptica cuantitativa, y al segundo grupo se le aplicaron los métodos de ensayos no destructivos y destructivo.

3.3.3- RECOCIDO DEL PRIMER GRUPO DE PROBETAS

El primer grupo de probetas (55 en total) fue introducido en un horno de mufla, marca Thermolyne Furnatrol III, con un rango de temperatura de 0 °C hasta 1.200 °C., para ser tratadas a temperaturas constantes, variando su tiempo de recocido, con el objeto de encontrar la temperatura adecuada que permitiera obtener una mayor tiempo para lograr el 100% de recristalización. Las muestras fueron tratadas a 350°C, 410 °C y 540 °C de acuerdo a la tabla siguiente:

TABLA N° 2. TRATAMIENTO DE MUESTRAS

NUMERO MUESTRA	TEMPERATURA DEL HORNO (°C)	TIEMPO RECOCIDO
1	540	15,30 HORAS
2	540	21,30 HORAS
3	540	43 HORAS
4	540	2 HORAS
5	540	4 HORAS
6	540	26 HORAS
7	540	6 HORAS
8	540	8 HORAS
9	540	10 HORAS
10	540	SIN RECOCER
11	540	10 MIN
12	540	20 MIN
13	540	40 MIN
14	540	60 MIN
15	540	1.20 HORS
16	540	1.40 HORAS
17	410	5 MIN
18	410	10 MIN
19	410	20 MIN
20	410	30 MIN
21	410	40 MIN

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL / PREPARACION DE LAS PROBETAS

NUMERO MUESTRA	TEMPERATURA DELHORNO (°C)	TIEMPO RECOCIDO
22	410	50 MIN
23	410	60 MIN
24	410	1.20 HORAS
25	410	1.40 HORAS
26	410	1.50 HORAS
27	350	5 MIN
28	350	10 MIN
29	350	20 MIN
30	350	30 MIN
31	350	40 MIN
32	350	50 MIN
33	350	1 HORA
34	350	1.10 HORAS
35	350	1.20 HORAS
36	350	1.30 HORAS
37	350	1.40 HORAS
38	350	1.53 HORAS
39	350	2.03 HORAS
40	350	2.15 HORAS
41	350	2.30 HORAS
42	350	2.45 HORAS
43	350	3.00 HORAS
44	350	3.15 HORAS
45	350	3.30 HORAS
46	350	3.45 HORAS
47	350	4.00 HORAS
48	350	4.15 HORAS
49	350	4.30 HORAS
50	350	4.45 HORAS
51	350	5 HORAS
52	350	6 HORAS
53	350	8 HORAS
54	350	11HORAS
55	350	14 HORAS

3.3.3- APLICACIÓN DE ENSAYOS DE DUREZA (VICKERS)

Se midió Dureza a toda las muestras anteriores, con el objeto de determinar el grado de recocido que presentan las probetas a la temperatura específica aplicada a cada una de ellas. Este valor se obtiene en función de la medición de la longitud promedio de las diagonales de la huella dejada por el penetrador y las cuales se convierten a valores de dureza Vickers mediante el uso de tablas de equivalencia estándar. El valor de dureza reportado por cada muestra, corresponde a un promedio de 10 mediciones de dureza realizadas durante el trabajo de laboratorio. Para la ejecución de estas medidas se utilizo un durómetro con un intervalo de carga entre 1 y 250 Kilogramos. Se midió la dureza Vickers con una carga de 10 Kg. Las mediciones de dureza se realizaron en las mismas secciones donde se hizo la microscopía óptica.

3.3.4- TÉCNICA METALOGRAFICA APLICADA. MUESTRAS DE 10 mm. x 10 mm.

3.3.4.1- PREPARACION DE LAS MUESTRAS.

Todas las muestras recocidas de este tamaño (10 mm x 10 mm), fueron montadas en polvo transópico de manera tal de facilitar su manipulación durante el desbaste y pulido posterior, teniendo cuidado siempre de que la observación se realizara en la cara superior de la muestra.

Todas las probetas fueron preparadas mecánicamente mediante procedimientos normales de desbaste y pulido ampliamente conocidos.

Para revelar la microestructura se aplicó un ataque electrolítico a las muestras utilizando para ello una fuente de poder. El contacto eléctrico con las probetas se realizó a través de un tornillo. La solución usada como electrolito fue una mezcla de 52 cm³ de ácido fluorhídrico (HF) al 48% y 973 cm³ de agua destilada. Se empleo como cátodo un vaso de acero inoxidable y se aplicó un voltaje de alrededor de 22,5 V. Este ataque dio lugar a la formación de una capa epitáxica sobre la superficie de la probeta, cuyos espesores óptimos se alcanzaron entre 20 y 25 segundos de ataque.

3.3.5- MICROSCOPIA OPTICA

Las muestras atacadas fueron observadas en un microscopio óptico (marca Versamet) bajo condiciones de luz polarizada, con el objeto de seguir la evolución micro-estructural de la aleación producida como consecuencia de la aplicación del tratamientos térmicos de recocido. En este sentido, se procedió a la determinación de la fracción volumétrica recristalizada.

3.3.6- MEDICIÓN DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA RECRISTALIZADA.

La medición de la fracción volumétrica recristalizada se llevó a cabo usando directamente el ocular del microscopio óptico el cual contiene una rejilla graduada de longitud conocida. La técnica de medición consistió en

determinar que condición tiene el grano en el segmento de la rejilla que lo toca. Para determinar el valor de la fracción recristalizada se realizó el corte de más de 500 granos con los segmentos de rejilla graduada por cada muestra preparada.

La fracción recristalizada se calculó de acuerdo a la siguiente relación:

$$X_v = \frac{N_{g_{rex}}}{N_{g_{cort}}} \times 100$$

Donde.

$N_{g_{rex}}$ = Número de granos recristalizados

$N_{g_{cort}}$ = Número de granos cortados por los segmentos de la rejilla.

3.3.7- PREPARACIÓN DEL SEGUNDO GRUPO DE PROBETAS

Una vez determinada la temperatura de trabajo se procedió a elaborar el segundo grupo de probetas, con el material anteriormente laminado, en estado de deformación al 66%, con las siguientes dimensiones: 420 mm. de largo x 32 mm. de ancho x 2.2. mm. de espesor. Las probetas obtenidas (Figura N° 9) serán utilizadas para la aplicación de los distintos métodos de ensayos no destructivos y destructivo.



FIGURA N° 9. SEGUNDO GRUPO DE PROBETAS LISTAS PARA LA APLICACIÓN DE LOS METODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

3.4 PREPARACION PARA LA APLICACIÓN DE LOS METODOS DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS

3.4.1- METODO DE LAS CUATRO PUNTAS

Para la aplicación del método de las cuatro puntas, corriente DC, se realizo un montaje con los siguientes equipos.

- Multímetro marca HP modelo 34401 A (amperios)
- Fuente de poder (0.20 V – 0.25 V), modelo Ley Bold-Heraeus.
- Multímetro marca HP modelo 34401 A (voltaje)

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL / PREPARACION PARA LA APLICACION DE LOS METODOS DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS/ METODO DE LAS CUATRO PUNTAS.

El equipo instalado (figuras N° 10 y N° 11) quedo conformado de la siguiente manera: Se colocaron dos (2) cuchillas a una distancia de 24,5 cm. sobre la probeta de aluminio, debajo de esta una lámina aislante. El valor de la resistencia fue medido mediante un multímetro y comprobado por una fuente de poder, un amperímetro y un voltímetro, verificando el cambio de resistividad de la corriente "DC".

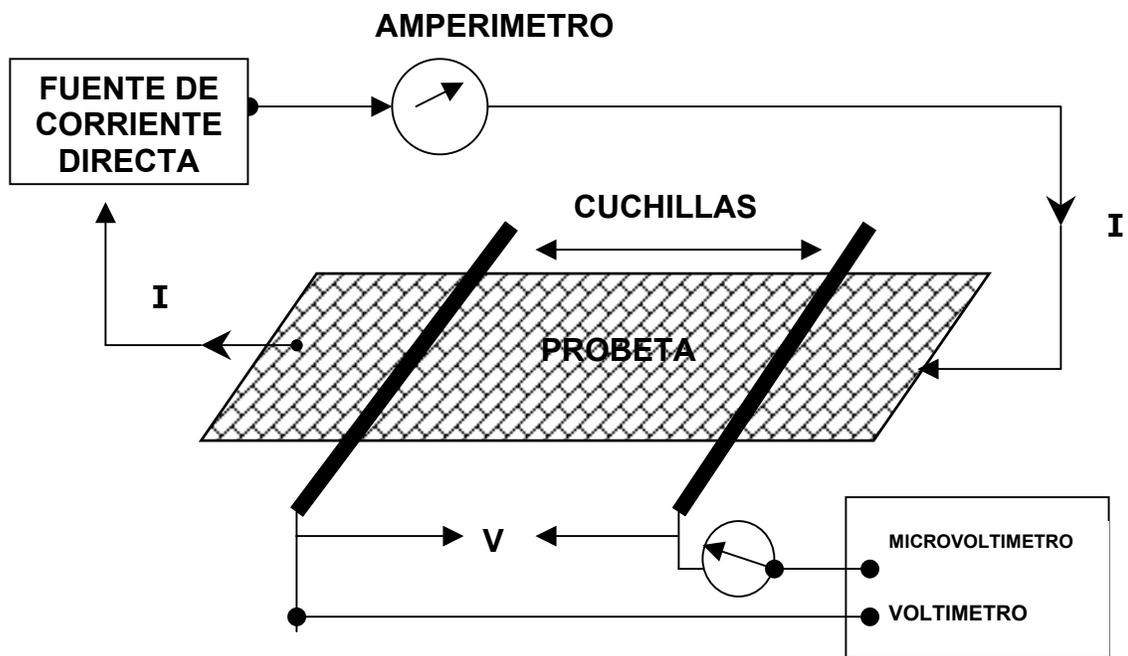


FIGURA N° 10. DIAGRAMA DEL METODO DE LAS CUATRO PUNTAS

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL / PREPARACION PARA LA APLICACION DE LOS METODOS DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS/ METODO DE LAS CUATRO PUNTAS.



FIGURA . N° 11 MONTAJE PARA MEDIR LAS PROBETAS CON EL METODO DE LAS 4 PUNTAS

Para iniciar la aplicación del presente método se requirió calcular el patrón de referencia mediante la aplicación de la siguiente formula:

$$\rho = \frac{V.m}{I.L.L' d}$$

Donde:

- ρ** = Resistividad en Ohm.mts
- v** = Voltaje
- m** = Masa en gramos
- I** = Intensidad de Corriente en Amperios
- L** = Longitud de la probeta
- L'** = Longitud de la cuchilla en mts.
- d** = Densidad del material ($2,7 \times 10^6$ gr/mts³)

3.3.2- METODO DE CORRIENTES INDUCIDAS.

Para la aplicación del método de corrientes inducidas se utilizó un equipo de inducidas con las siguientes características:

- Palpador: Medidor de conductividad para 200 Khz.
- Humedad relativa: 50 %
- Temperatura: 23 °C
- Drive: 100%
- Ganancia: 85 DV
- Frecuencia: 200 Khz.
- Fase: 15°

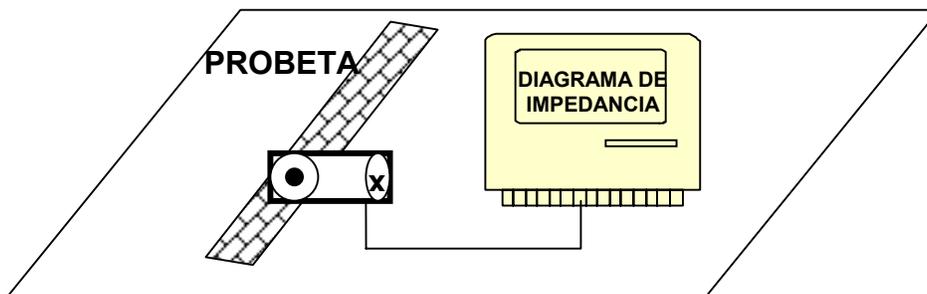


FIGURA N° 12. DIAGRAMA DEL METODO DE CORRIENTE INDUCIDAS

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL / PREPARACION PARA LA APLICACION DE LOS METODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS/ METODO DE CORRIENTES INDUCIDAS.



FIGURA N° 13. APLICANDO CORRIENTES INDUCIDAS. VALORES EN LA CUADRICULA DEL INSTRUMENTO DE DIAGRAMA DE IMPEDANCIA.

Una vez obtenidos los valores de trazos continuos para cada una de las probetas a ensayar, se procede a calibrar el equipo de corrientes inducidas para conseguir un valor absoluto que indique la resistividad de cada probeta recristalizada. Para ello se realizó el siguiente experimento:

- Equipo de corriente inducida
- Probeta Alcaven 6063-T5 (Aluminio)
- Coeficiente de resistividad de la pieza: $2,824 \times 10^{-8}$ ohm mts
- Temperatura: 23 °C
- Humedad relativa: 50 %
- Drive: 100%
- Ganancia: 85 Dv
- Frecuencia: 200 KHz.
- Fase: 15 grados
- Termómetro

Procedimiento:

- En un recipiente se introduce una probeta de aluminio (en forma cilíndrica), se le vierte agua sin sobrepasar la pieza y se coloca un termómetro.
- A distancia de este recipiente se coloca una probeta idéntica y se mantiene a temperatura ambiente.
- Se calibra el equipo con la pieza exterior a una temperatura de 23 ° C, indicando en la cuadrícula de la pantalla el punto cero, tomándose el mismo como punto inicial.
- Se inicia el calentamiento del agua tomando los valores de cada división según la temperatura correspondiente. Se reportan estos valores en la tabla N° 10 y figura N° 32.

3.4.3- METODO DE LA FUERZA

Por medio de este método se obtiene las variaciones relativas de la tensión en una bobina plana, colocada con su eje normal a la probeta del material estudiado (como se muestra en la fig. No.14 y 15). Se determina la corriente requerida para que la fuerza de interacción entre la probeta y la bobina, alcance un valor pre-establecido para una distancia dada, para cada valor de la frecuencia. La bobina se impulsa con una corriente senoidal.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL / PREPARACION PARA LA APLICACION DE LOS METODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS/ METODO DE LA FUERZA.

Características de la Bobina:	Equipo:
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Diámetro externo. 3 cm. ➤ Altura. 1,15 cm. ➤ Diámetro interno. 0,6 cm. ➤ No. de vueltas. 1600 ➤ Hilo. 0,2 mm con recubrimiento <p>Núcleo de aire.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Hewlett Packard 3311A ➤ Impedancia. 600 ohm ➤ Frecuencia Nominal 1 KHz.

Procedimiento:

- Se coloca la probeta en la balanza con un soporte de goma.
- Se calibra la balanza con las pesas.
- Se toma la lectura del peso de cada probeta.
- Se introduce un trípode con una bobina, la cual va a tener un roce de rebote con la probeta, teniendo en cuenta de mantener el mismo valor obtenido en la regleta.
- Se aumenta la amplitud hasta que de tres espacios más en la regleta.
- Se espera que se establezca la regleta.
- Se toma la lectura en "mV"

Como se puede observar en la figura No. 14 y 15 presentada a continuación.

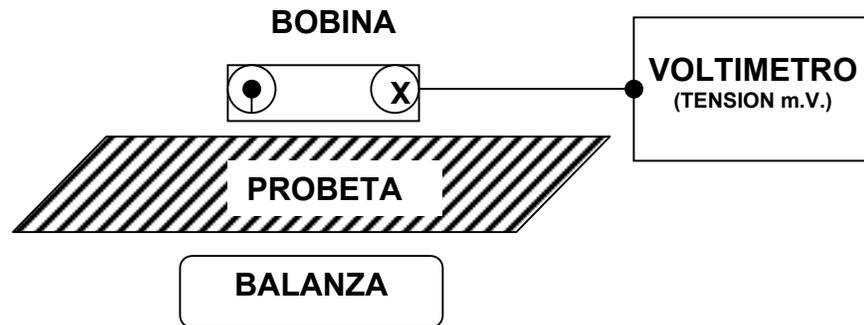


FIGURA N° 14 MONTAJE PARA LA APLICACIÓN DEL METODO DE LA FUERZA



FIGURA N° 15 BALANZA CON LA QUE SE APLICO EL MÉTODO DE LA FUERZA

3.3.4- METODO DE TRANSMISION

Mediante este método es posible determinar la dependencia de la fuerza electromotriz inducida en una bobina que se encuentra al otro lado de la pieza, del cual se encuentra la bobina impulsora. Se emplearon bobinas de 500 vueltas con núcleo de aire, impulsadas con una corriente senoidal a una frecuencia de 5,00 kHz (Ver figuras N° 16 y N° 17). Las bobinas se colocaron a una distancia fija de las probetas y alineadas axialmente (eje perpendicular

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL / PREPARACION PARA LA APLICACION DE LOS METODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS/ METODO DE TRANSMISION.

a las probeta). El radio medio de las bobinas es aproximadamente 1/10 de las dimensiones de las probetas. Se verifico el efecto de borde efectuando mediciones con las bobinas cerca del mismo, comprobándose que este efecto es despreciable aun para distancias al borde del orden de 2 veces el radio de la bobina (medido desde el eje de lámina).

EQUIPO UTILIZADO	CARACTERISTICAS DE LA BOBINA
Hewlett Packard : 1) Voltímetro para medir Tensión: 34401A 2) Voltímetro para medir resistencia: 33120A 3) Corriente AC 4) Amplitud: 10 VOLT. 5) Frecuencia: 5 KHz 6) Tensión sin Muestra: 84,40 mV.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ No. de vueltas: 500 ➤ Diámetro Interior: 6 mm ➤ Diámetro exterior: 14,5 mm ➤ Diámetro Alambre de cobre: 0,015 mm ➤ Altura: 8,8 mm

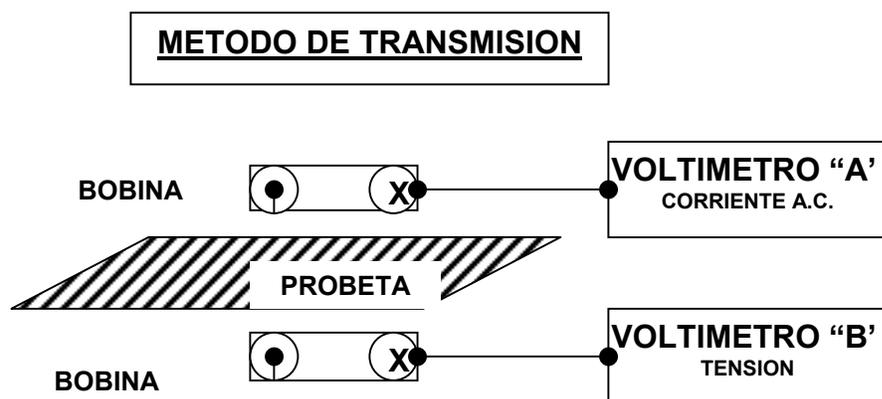
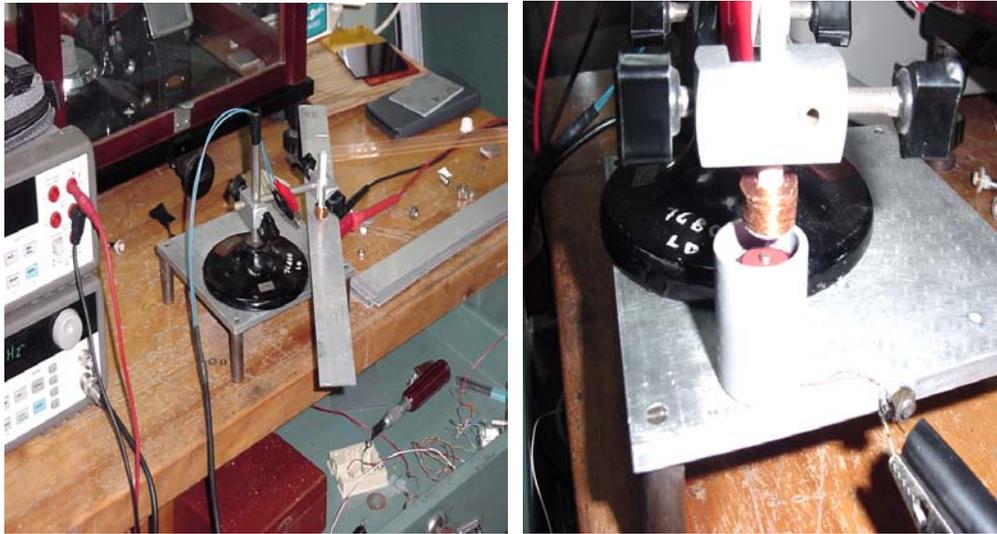


FIGURA N° 16. Diagrama del Método de Transmisión



PROBETAS Y EQUIPOS

BOBINAS UTILIZADAS

FIGURA N° 17. EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE TRANSMISIÓN

3.5- PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE:

En esta sección se procederá a calcular la Incertidumbre para los equipos y valores utilizados en el presente estudio, por medio de la aplicación del método estadístico conocido como Desviación Estándar, a través del programa **MAPLE**, por ser este método el mas apropiado para una serie de mediciones independientes.

DESVIACION ESTANDAR

$$\sigma^2 = \sum [(X_i - X)^2 / (n \times (n-1))]$$

Equipos y Medidas con Incertidumbre:

- Multímetro Hp 34401A (según Manual del Equipo)

{	- Tensión	{	% Lectura: 0,0050
			% Rango: 0,0035 μ v
{	- Intensidad	{	% Lectura: 0,120
			% Rango: 0,020A
- Balanza
- Cinta Métrica
- Termómetro
- Densidad
- Resistividad

CAPITULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACION

4.0 ENSAYOS DE DUREZA

Luego de aplicar el procedimiento de medición de dureza para las distintas probetas, los resultados obtenidos se indican en la tabla No. 3

TABLA N° 3. MEDICIONES DE DUREZA (VICKERS)

No. MUESTRA	CARGA EN Kg.	PROM DUREZAS VICKERS
1	5	31,24
2	5	32,22
4	5	36,4
5	5	34,74
7	5	36,32
8	5	35,1
10	5	51,95
10	10	68,12
11	10	37,12
12	10	37
13	10	36,9
17	10	43,62
18	10	39,5
19	10	37
20	10	37,4
21	10	37,42
23	10	36,9
25	10	36,5
26	10	36,5
27	10	54,76
28	10	54,58
29	10	52,78
30	10	51,86
31	10	50,52

No. MUESTRA	CARGA EN Kg.	PROM DUREZAS VICKERS
32	10	50,52
33	10	48,58
34	10	47,66
35	10	47,66
36	10	47,54
37	10	46,76
38	10	46,7
39	10	49,22
40	10	51.2
42	10	51.34
45	10	49,88
46	10	46,74
48	10	46,02
50	10	44,22
51	10	45,6
52	10	44,92
53	10	44,18
54	10	42,98
55	10	41,6

4.1- SELECCIÓN DE LA TEMPERATURA IDEAL DE TRABAJO

En el análisis de los datos obtenidos de las tablas anteriores, se observo que las probetas recocidas a 410°C proporcionan intervalos de tiempo en el proceso de recristalización que permite iniciar los estudios de resistividad bajo los métodos de ensayos no destructivos y destructivo.

Para verificar lo anteriormente descrito, se procedió a efectuar prueba de metalografía a la muestra N° 26 (Figura N° 18) por ser esta la que presentaba mayor tiempo de recocido a la temperatura señalada, con el objeto de apreciar el grado de recristalización. (Durante este proceso también se observó que la probeta N° 13 tratada a una temperatura de

540°C, se encontraba recristalizada 100% en un tiempo de 40 minutos, y la probeta N° 55, tratada a una temperatura de 350°C, a las 14 horas no había iniciado el proceso de recristalización, medidas que no permiten efectuar los trabajos objeto de estudio).



FIGURA N° 18. MICROFOTOGRAFIA OPTICA N°1. AUMENTO 50X .
PROBETA N° 26. MUESTRA DEFORMADA AL 3,63%.

Se pudo observar, a la luz del microscopio, que la probeta N° 26 apenas se encontraba en un 3,63% de recristalización, muy por debajo del 100% requerido.

4.2- TRATAMIENTO TERMICO DEL SEGUNDO GRUPO DE PROBETAS:

Por lo anterior, nuevamente se procedió a recocer a la temperatura de 410 °C y con mayor variación de tiempo, un nuevo grupo de probetas obteniendo los siguientes resultados

TABLA N° 4. TRATAMIENTO NUEVO GRUPO DE PROBETAS

No. MUESTAS	TEMP HORNO	TIEMP RECOCIDO	% RECRISTALIZACIÓN (POR MICROSCOPIA OPTICA CUANTITATIVA)
26	410 °C	2 Hrs	3,63%
58	410 °C	6 Hrs	10%
59	410 °C	10 Hrs	18,18%
60	410 °C	17 Hrs	22%
61	410°C	24 Hrs	43,63%
62	410 °C	34 Hrs	50,90%
63	410 °C	49 Hrs	52,72%
64	410 °C	62Hrs, 30 Min	80,90%
65	410 °C	73 Hrs, 15 Min	100%

Se observo que los resultados obtenidos se encontraban acorde con los parámetros requeridos para el estudio, en consecuencia quedo seleccionada la temperatura de 410°C como la temperatura idónea para recocer el segundo grupo de probetas al cual le serán aplicadas las técnicas de ensayo no destructivo, con el propósito de medir los cambios de resistividad en los diferentes niveles de recristalización de la aleación de aluminio comercial 3003 H14.

4.3 RESULTADO DE LA FRACCION RECRISTALIZADA

Los resultados del calculo de la fracción recristalizada para las probetas del número 58 al 65 se encuentran señalados en la tabla N° 4.

A continuación se presenta relación del porcentaje de recristalización de las probetas en función del tiempo de recocido (expresado en minutos) para

una temperatura constantes de 410 °C. Los resultados son presentados en la Tabla N° 5 y figura N° 19.

TABLA N° 5. %RECRISTALIZACIÓN Vs. TIEMPO RECOCIDO

% Recristalización	
Tiempo (min.)	%
300	9.00
360	10.00
1020	22.00
1440	43.63
2940	52.72
3750	80.90
4395	100.00

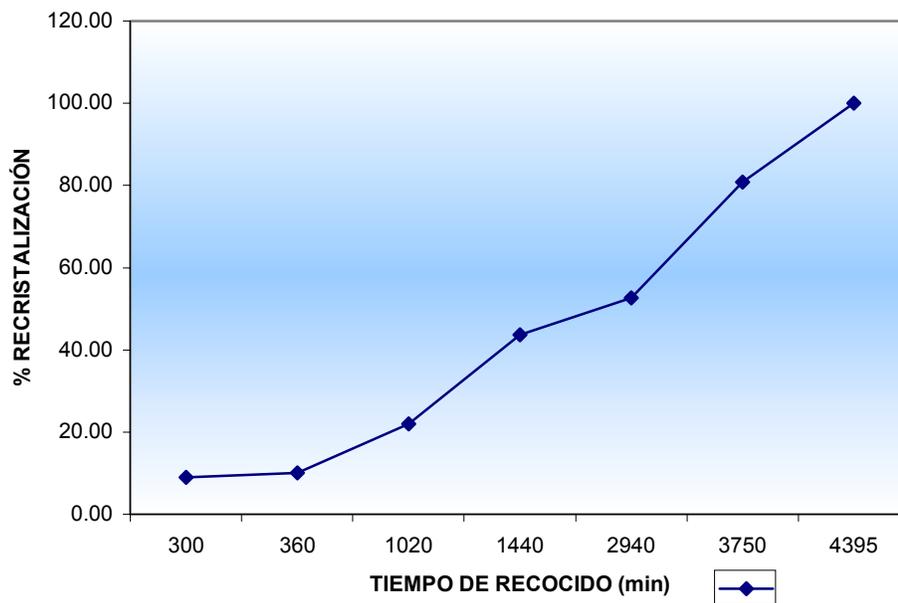


FIGURA N° 19. PORCENTAJE DE RECRISTALIZACION Vs. TIEMPO DE RECOCIDO (minutos)

4.4- MICROFOTOGRAFIAS

En las microfotografías siguientes se observa la evolución microestructural de las muestras deformadas sometidas a diferentes grados de recocido, hasta alcanzar una estructura totalmente recristalizada.



FIGURA N° 20. MICROFOTOGRAFIA OPTICA N°2. AUMENTO 50X .
PROBETA N° 65. MUESTRA DEFORMADA SIN RESCRITALIZAR



FIGURA N° 21. MICROFOTOGRAFIA OPTICA N° 3. AUMENTO 50X .
PROBETA N° 58. MUESTRA RECRISTALIZADA AL 10 %.

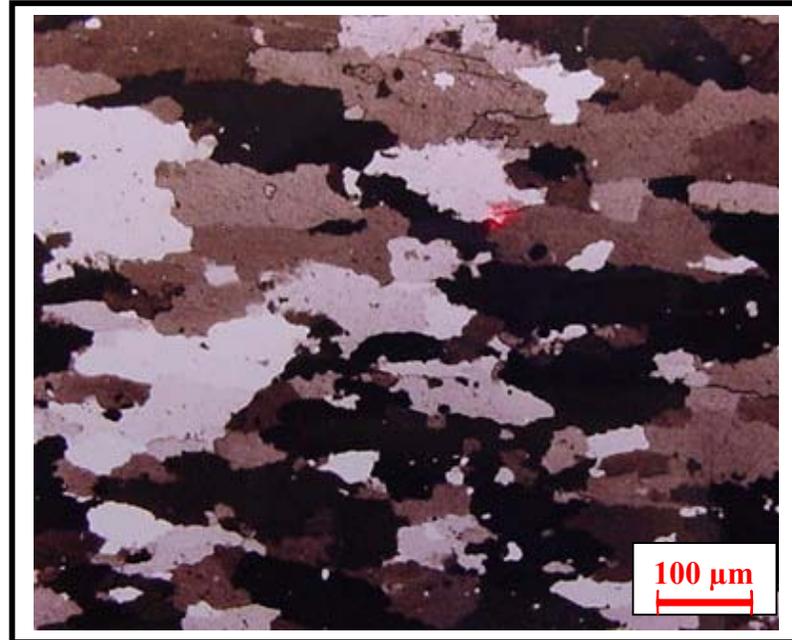


FIGURA N° 22 MICROFOTOGRAFIA OPTICA N° 4. AUMENTO 50X . PROBETA
N° 59. MUESTRA RECRISTALIZADA AL 18,18 %.



FIGURA N° 23. MICROFOTOGRAFIA OPTICA N° 5. AUMENTO 50X . PROBETA N° 60. MUESTRA RECRISTALIZADA AL 22 %.



FIGURA N° 24. MICROFOTOGRAFIA OPTICA N° 6. AUMENTO 50X . PROBETA N° 61. MUESTRA RECRISTALIZADA AL 43,63 %



FIGURA N° 25. MICROFOTOGRAFIA OPTICA N° 7. AUMENTO 50X . PROBETA N° 63. MUESTRA RECRISTALIZADA AL 52,72 %

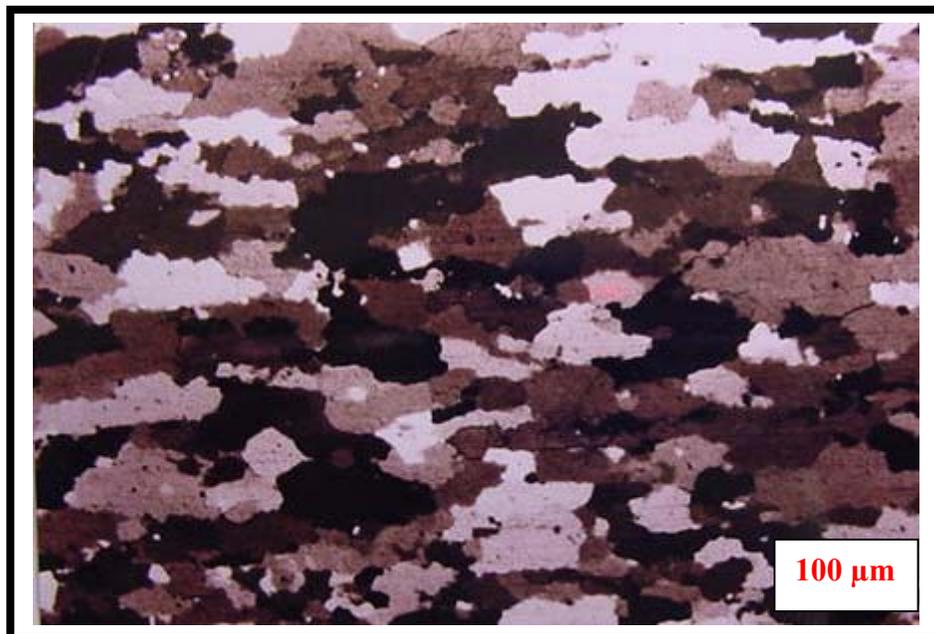


FIGURA N° 26. MICROFOTOGRAFIA OPTICA N° 8. AUMENTO 50X . PROBETA N° 64. MUESTRA RECRISTALIZADA AL 80,90 %

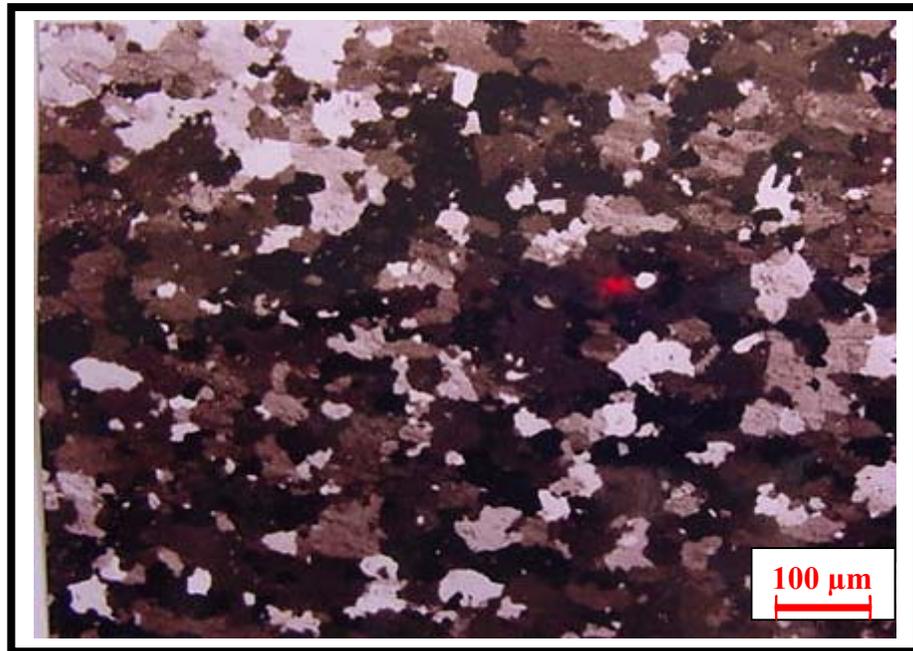


FIGURA N° 27. MICROFOTOGRAFIA OPTICA N° 9. AUMENTO 50X . PROBETA N° 65. MUESTRA RECRISTALIZADA AL 100 %

4.5 RESULTADO DE LA APLICACIÓN DEL METODO DE LAS CUATRO PUNTAS.

Los resultados se muestran en la tabla No. 6. A cada probeta se le tomaron cinco medidas de referencia para promediar el resultado.

TABLA N° 6. MEDICIONES DE RESISTIVIDAD SOBRE LAS PROBETAS SIN RECOGER

PROBETA	% DEFORM	VOLTAJE	PESO	AMP	LONG	LC	K	ro	PROMEDIO (ro)
		Volt	(gr.)	A	mts	mts	gr./mts ³	Ω mts	Ω mts
1.1	66%	0,00038	79,7092	2,0937	0,41	0,3502	2700000	3,7E-08	
1.1	66%	0,000379	79,7092	2,0937	0,41	0,3502	2700000	3,7E-08	

RESULTADOS DE LA INVESTIGACION / RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO DE LAS CUATRO PUNTAS

PROBETA	% DEFORM	VOLTAJE	PESO	AMP	LONG	LC	K	ro	PROMEDIO (ro)
1.1	66%	0,00038	79,7092	2,0935	0,41	0,3502	2700000	3,7E-08	
1.1	66%	0,000381	79,7092	2,0933	0,41	0,3502	2700000	3,7E-08	
1.1	66%	0,000381	79,7092	2,0933	0,41	0,3502	2700000	3,7E-08	
									3,73408E-08
1.2	66%	0,000365	80,5016	2,0401	0,41	0,3502	2700000	3,7E-08	
1.2	66%	0,000365	80,5016	2,0422	0,41	0,3502	2700000	3,7E-08	
1.2	66%	0,000365	80,5016	2,0457	0,41	0,3502	2700000	3,7E-08	
1.2	66%	0,000365	80,5016	2,0424	0,41	0,3502	2700000	3,7E-08	
1.2	66%	0,000365	80,5016	2,0434	0,41	0,3502	2700000	3,7E-08	
									3,71036E-08
1.3	66%	0,00039	76,2444	2,0673	0,4085	0,3502	2700000	3,7E-08	
1.3	66%	0,000393	76,2444	2,0883	0,4085	0,3502	2700000	3,7E-08	
1.3	66%	0,000393	76,2444	2,089	0,4085	0,3502	2700000	3,7E-08	
1.3	66%	0,000393	76,2444	2,0895	0,4085	0,3502	2700000	3,7E-08	
1.3	66%	0,000394	76,2444	2,0904	0,4085	0,3502	2700000	3,7E-08	
									3,71709E-08
1.4	66%	0,000365	79,0756	2,0024	0,408	0,3502	2700000	3,7E-08	
1.4	66%	0,000366	79,0756	2,0076	0,408	0,3502	2700000	3,7E-08	
1.4	66%	0,00038	79,0756	2,0993	0,408	0,3502	2700000	3,7E-08	
1.4	66%	0,000379	79,0756	2,09	0,408	0,3502	2700000	3,7E-08	
1.4	66%	0,000379	79,0756	2,0899	0,408	0,3502	2700000	3,7E-08	
									3,72355E-08
2.1	66%	0,000397	78,9418	2,089	0,4255	0,3502	2700000	3,7E-08	
2.1	66%	0,000387	78,9418	2,0344	0,4255	0,3502	2700000	3,7E-08	
2.1	66%	0,000387	78,9418	2,0351	0,4255	0,3502	2700000	3,7E-08	
2.1	66%	0,000389	78,9418	2,0353	0,4255	0,3502	2700000	3,8E-08	
2.1	66%	0,000398	78,9418	2,0897	0,4255	0,3502	2700000	3,7E-08	

RESULTADOS DE LA INVESTIGACION / RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO DE LAS CUATRO PUNTAS

Finalmente, se obtiene como valor de referencia de resistividad ρ_0 el cual será usado para la comparación de la resistividad sobre las distintas probetas recocidas:

$$\rho_0 = (3,7 \pm 0,1) \times 10^{-8} \Omega m$$

Continuando con el proceso de comparación se procedió a recocer las probetas a la temperatura de 410 °C y a los tiempos señalados, obteniéndose los porcentajes de recristalización deseados. Se aplico el método de cuatro puntas (igualmente cinco medidas para cada probeta) consiguiendo los siguientes valores:

TABLA N° 7. MEDICIONES DE RESISTIVIDAD SOBRE LAS PROBETAS RECOCIDAS

PROBETA	%		VOLTAJE	PESO	AMP	LONG	LC	K	ro	
	DEFORM	RECRIST								
			Volt	(gr.)	A	Mts	mts	gr./mts ³	Ω mts	Ω mts
1.2	66%	100%	0,000328	80,5016	2,0005	0,41	0,3502	2700000	3,4E-08	
1.2	66%	100%	0,000329	80,5016	2,0009	0,41	0,3502	2700000	3,41E-08	
1.2	66%	100%	0,000329	80,5016	2,005	0,41	0,3502	2700000	3,41E-08	
1.2	66%	100%	0,000329	80,5016	2,0044	0,41	0,3502	2700000	3,41E-08	
1.2	66%	100%	0,000329	80,5016	2,0082	0,41	0,3502	2700000	3,4E-08	
										3,40736E-08
1.3	66%	80,90%	0,000348	76,2444	2,0021	0,4085	0,3502	2700000	3,43E-08	

RESULTADOS DE LA INVESTIGACION / RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO DE LAS CUATRO PUNTAS

PROBETA	% DEFORM	RECRIST	VOLTAJE	PESO	AMP	LONG	LC	K	ro	
1.3	66%	80,90%	0,000347	76,2444	2,0058	0,4085	0,3502	2700000	3,41E-08	
1.3	66%	80,90%	0,000347	76,2444	2,0011	0,4085	0,3502	2700000	3,42E-08	
1.3	66%	80,90%	0,000348	76,2444	2,0039	0,4085	0,3502	2700000	3,43E-08	
1.3	66%	80,90%	0,000347	76,2444	2,0024	0,4085	0,3502	2700000	3,42E-08	
										3,42351E-08
2.1	66%	22%	0,000356	78,9418	2,0015	0,4255	0,3502	2700000	3,49E-08	
2.1	66%	22%	0,000356	78,9418	2,0099	0,4255	0,3502	2700000	3,48E-08	
2.1	66%	22%	0,000358	78,9418	2,0096	0,4255	0,3502	2700000	3,5E-08	
2.1	66%	22%	0,000356	78,9418	2,0069	0,4255	0,3502	2700000	3,48E-08	
2.1	66%	22%	0,000355	78,9418	2,003	0,4255	0,3502	2700000	3,48E-08	
										3,48379E-08
2.2	66%	43,63%	0,000352	79,0544	2,0045	0,4255	0,3502	2700000	3,45E-08	
2.2	66%	43,63%	0,000351	79,0544	2,0085	0,4255	0,3502	2700000	3,43E-08	
2.2	66%	43,63%	0,000351	79,0544	2,0038	0,4255	0,3502	2700000	3,44E-08	
2.2	66%	43,63%	0,000352	79,0544	2,008	0,4255	0,3502	2700000	3,44E-08	
2.2	66%	43,63%	0,000351	79,0544	2,0017	0,4255	0,3502	2700000	3,45E-08	
										3,44326E-08
2.3	66%	52,72%	0,00035	79,9454	2,0323	0,4247	0,3502	2700000	3,43E-08	
2.3	66%	52,72%	0,000349	79,9454	2,0284	0,4247	0,3502	2700000	3,43E-08	
2.3	66%	52,72%	0,000348	79,9454	2,023	0,4247	0,3502	2700000	3,42E-08	
2.3	66%	52,72%	0,000346	79,9454	2,0052	0,4247	0,3502	2700000	3,44E-08	
2.3	66%	52,72%	0,000346	79,9454	2,0041	0,4247	0,3502	2700000	3,44E-08	
										3,43016E-08
2.4	66%	9%	0,000355	79,7004	2,0082	0,4227	0,3502	2700000	3,53E-08	
2.4	66%	9%	0,000354	79,7004	2,0014	0,4227	0,3502	2700000	3,53E-08	
2.4	66%	9%	0,000355	79,7004	2,009	0,4227	0,3502	2700000	3,52E-08	

RESULTADOS DE LA INVESTIGACION / RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO DE LAS CUATRO PUNTAS

PROBETA	% DEFORM	RECRIST	VOLTAJE	PESO	AMP	LONG	LC	K	ro	
2.4	66%	9%	0,000355	79,7004	2,0011	0,4227	0,3502	2700000	3,54E-08	
2.4	66%	9%	0,000354	79,7004	2,0063	0,4227	0,3502	2700000	3,52E-08	
										3,52639E-08
3.1	66%	10%	0,000348	79,8302	2,006	0,4215	0,3502	2700000	3,47E-08	
3.1	66%	10%	0,000349	79,8302	2,0059	0,4215	0,3502	2700000	3,49E-08	
3.1	66%	10%	0,00035	79,8302	2,0075	0,4215	0,3502	2700000	3,49E-08	
3.1	66%	10%	0,000349	79,8302	2,0048	0,4215	0,3502	2700000	3,49E-08	
3.1	66%	10%	0,00035	79,8302	2,0038	0,4215	0,3502	2700000	3,5E-08	
										3,48755E-08

Obtenido el promedio de la resistividad eléctrica de las probetas recocidas al 100%, el cual es:

$$\rho_1 = (3,4 \pm 0,1) \times 10^{-8} \Omega m$$

se procedió a compararla con el patrón de referencia ρ_0 con el objeto de comprobar que es posible inferir que dependiendo de la resistividad eléctrica que presentan las probetas, podemos saber el grado de recristalización aproximado que tienen las mismas ya que en la medida que aumenta el porcentaje de recristalización la resistividad disminuye, como se aprecia en el figura N° 28.

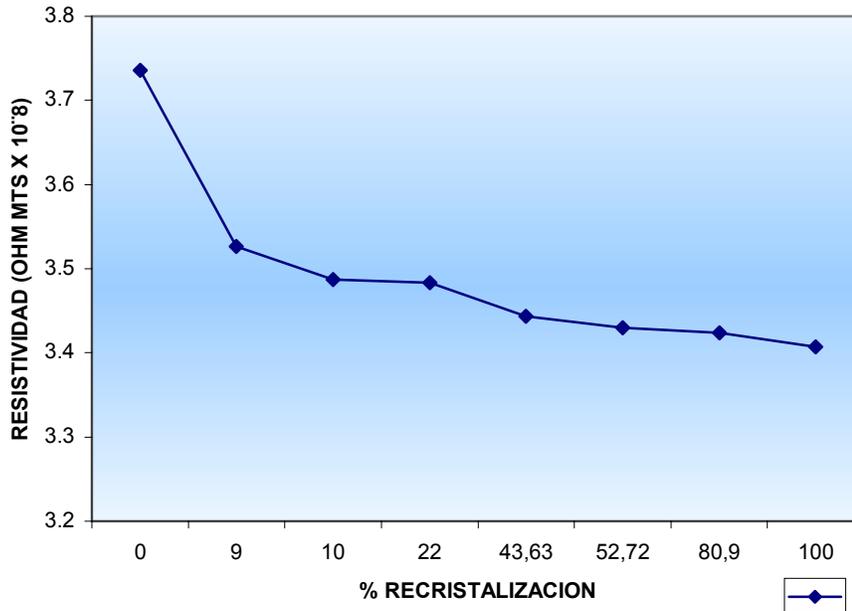
RESULTADOS DE LA INVESTIGACION / RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO DE LAS CUATRO PUNTAS

FIGURA 28. RESISTIVIDAD VS. % DE RECRISTALIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE ALUMINIO 3003, APLICANDO EL MÉTODO DE LAS 4 PUNTAS.

La figura N° 29 muestra los valores de conductividad CD calculados por el método de las 4 puntas (M4P), en función del porcentaje de recrystalización, determinado mediante técnicas metalográficas.

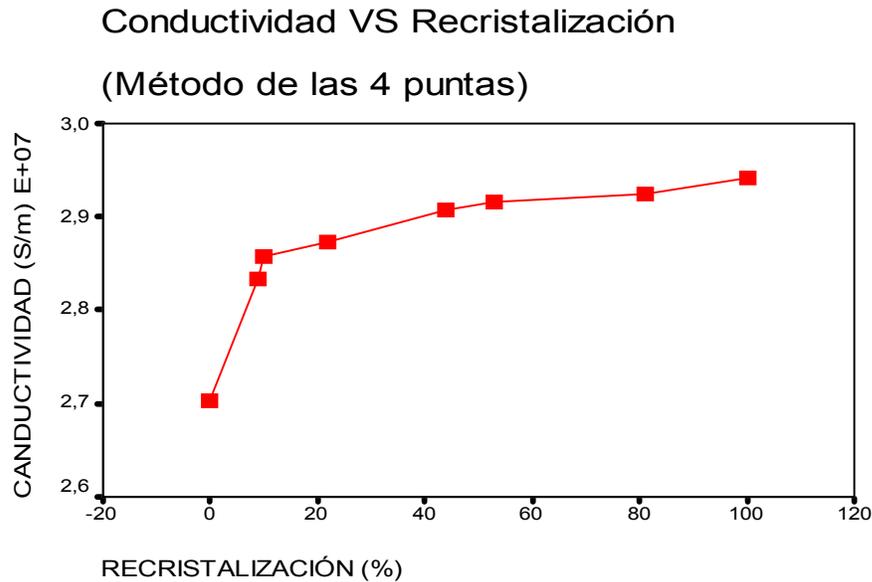


FIGURA N° 29. VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD CON EL PORCENTAJE DE RECRISTALIZACIÓN PARA PROBETAS HOMOLOGADAS MEDIANTE DEFORMACIÓN EN FRÍO. LAS CONDUCTIVIDADES INICIALES DE LAS PROBETAS (ANTES DEL TRATAMIENTO TÉRMICO) PRESENTAN VARIACIONES MENORES AL 0,1%.

Como se observa en la figura N° 29, la conductividad aumenta aproximadamente un 10% del valor inicial, partiendo de una probeta con 0%, hasta la correspondiente al 100% de recristalización.

Ahora bién, con el fin de contrastar los datos obtenidos con resultados simulados se procede a dimensionar los valores anteriores calculando la variación relativa, tomando para ello la resistividad obtenida por el método de las 4 puntas menos la resistividad inicial (promedio de las medidas de las probetas 100% deformadas), como se muestra en la tabla N° 8 y su graficas N° 30 y N° 31.

TABLA N° 8. VARIACION RELATIVA DE LA RESISTIVIDAD

METODO DE LAS 4 PUNTAS		
% Recristalización	Variación ($\Delta\rho = \rho - \rho_0$) Resistividad (ohmmts x 10^{-8})	Variación Relativa ($\Delta\rho/\rho_0$)
0	0.00	0.00000
9	-0.21	-0.05621
10	-0.248	-0.06638
22	-0.252	-0.06745
43,63	-0.293	-0.07842
52,72	-0.306	-0.08191
80,9	-0.312	-0.08351
100	-0.329	-0.08806

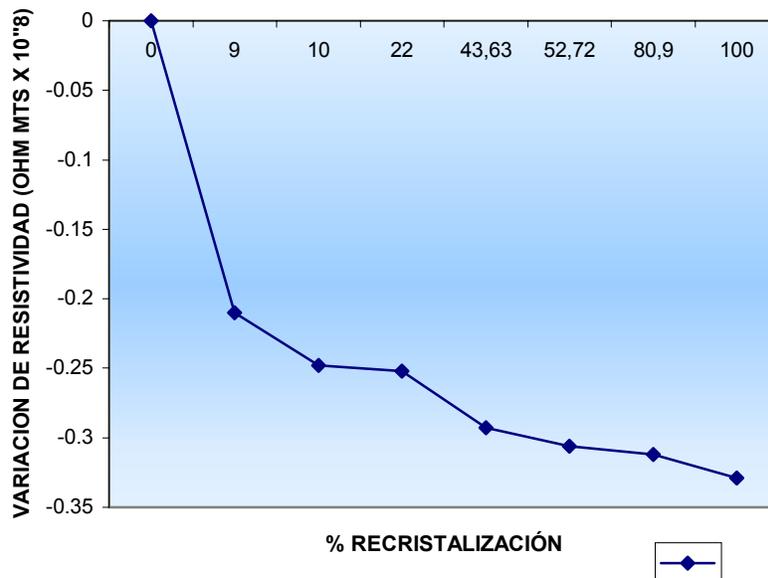


FIGURA N° 30 VARIACIÓN DE RESISTIVIDAD, TOMANDO COMO REFERENCIA EL VALOR INICIAL. LOS TRAZOS CONTINUOS SON SIN AJUSTES.

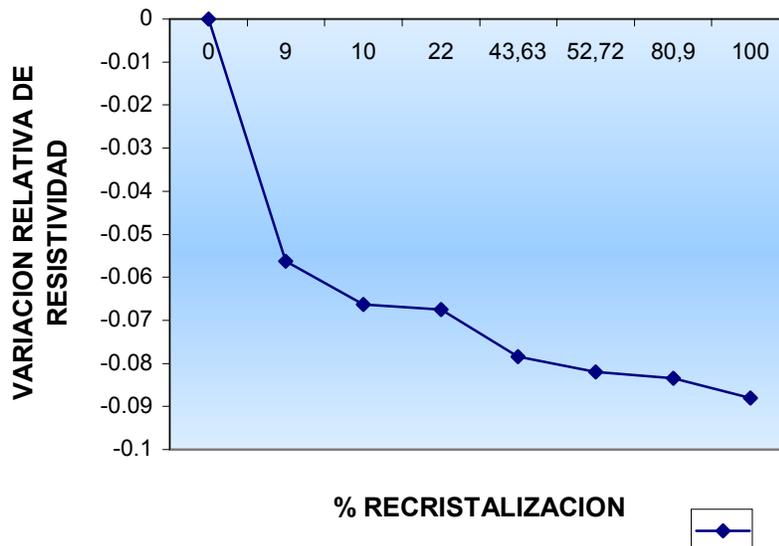


FIGURA N° 31.VARIACIÓN RELATIVA DE RESISTIVIDAD (MÉTODO DE LAS 4 PUNTAS). OBSÉRVESE LA VARIACIÓN RELATIVA DE LA RESISTIVIDAD EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE RECRISTALIZACIÓN, LA CUAL VARÍA HASTA UN 10% SEGÚN CADA PROBETA $(\rho_0 - \rho) / \rho_0$.

4.6 RESULTADO DE LA APLICACIÓN DEL METODO DE CORRIENTE INDUCIDAS.

Los resultados obtenidos, para cada probeta objeto de estudio, son observados como trazos continuos en el equipo de inducidas, los cuales a su vez se diferencian uno del otro de acuerdo a la cantidad de divisiones que marcan en la cuadrícula de la pantalla del diagrama de imprdancia. Estos valores son promediados y se indican a continuación. (Tabla N° 9 y 10. Figura N° 32).

RESULTADOS DE LA INVESTIGACION / RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO DE
CORRIENTES INDUCIDAS

TABLA N° 9. DIFERENTES MEDIDAS CUADRICULA DEL INSTRUMENTO DE IMPEDANCIA

Recristalización	Medida I	Medida II	Medida III	Medida IV	Medida V	Promedio
0%	0	0	0	0	0	0
9%	4.8	6	5	5	4.8	5.12
10%	5	6	5	5.5	5	5.3
22%	6	6	5.5	6	5.2	5.74
43.63%	6	7.4	6.5	6.6	7.2	6.74
52.72%	7	7.8	6.8	7	7.5	7.22
80.90%	7	7.5	7.2	7.5	7.5	7.34
100%	8	8.3	7.8	7.5	7.2	7.76

TABLA N° 10. VALORES DE DEFLEXIÓN DE LA INDICACIÓN DEL EQUIPO DE CORRIENTES INDUCIDAS (EN DIVISIONES) PARA LOS DIVERSOS VALORES DE TEMPERATURA DE LA PROBETA

TEMPERATURA	DIVISIONES
23	0
27	-0.5
29,5	-2
31	-3.2
32	-3.6
32,5	-3.8
35	-4.2
36	-5.2
38	-5.5
42	-7
43,5	-7.5

RESULTADOS DE LA INVESTIGACION / RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO DE
CORRIENTES INDUCIDAS

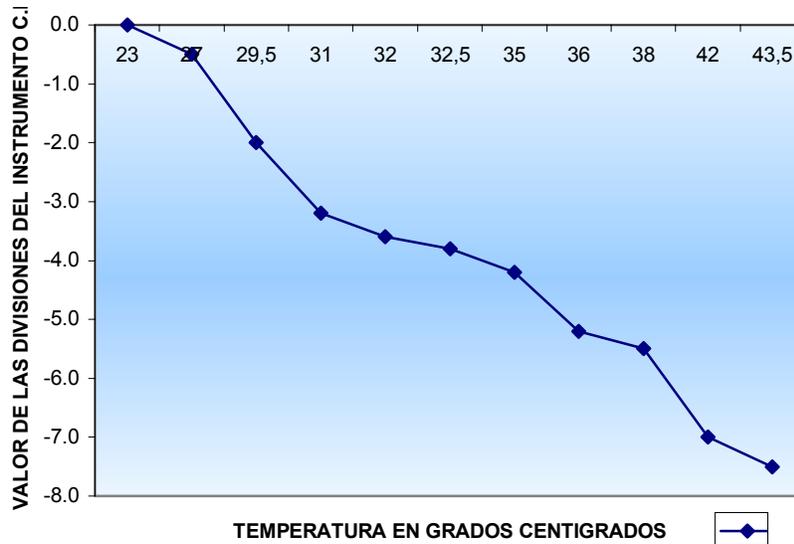


FIGURA N° 32. CALIBRACIÓN DEL INSTRUMENTO DE CORRIENTE INDUCIDA. VALOR ABSOLUTO DE LAS DIVISIONES DEL EQUIPO PARA LÁMINAS DE ALUMINIO. LOS TRAZOS CONTINUOS SON SIN AJUSTES.

Seguidamente se toma los valores de las corrientes inducidas de las probetas recristalizadas obteniendo como resultado valores de las divisiones de la cuadrícula de la pantalla. Con el fin de conseguir el valor absoluto de la corriente a la frecuencia de ensayo se aplica el factor de corrección mediante Mínimos Cuadrados, encontrándose la pendiente m para °C/división, como se especifica en la figura N° 33.

$$\rho = (3,456 + 0,0341 d) \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$$

$$\Delta \rho = 0,03431 \times 10^{-8} d = \rho = a + bd = 0,03431 \times 10^{-8} \Omega \text{ m/div}$$

$$m = \text{pendiente} = - 0,03431 \times 10^{-8} \Omega \text{ m/div}$$

RESULTADOS DE LA INVESTIGACION / RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO DE
CORRIENTES INDUCIDAS

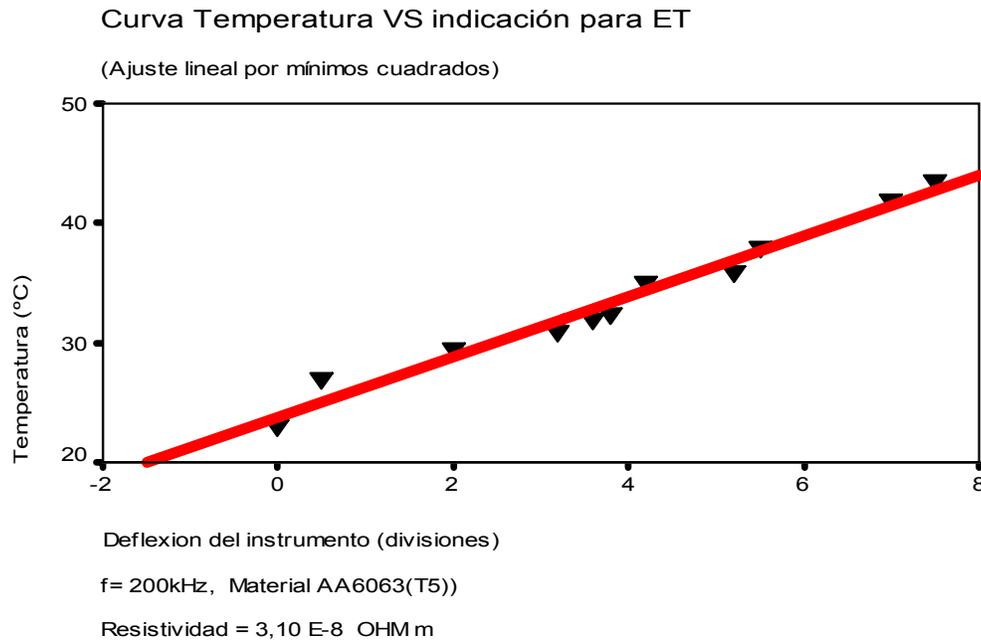


FIGURA N°33. DETERMINACIÓN DE LA RESPUESTA DEL INSTRUMENTO DE DIAGRAMA DE IMPEDANCIA (CI) CON LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA. EL AJUSTE MEDIANTE MÍNIMOS CUADRADOS PERMITE DETERMINAR UNA PENDIENTE $M = (2,6 \pm 0,1) \text{ } ^\circ\text{C/DIVISIÓN}$. UTILIZANDO EL COEFICIENTE DE TEMPERATURA α PARA LA ALEACIÓN UTILIZADA ($\alpha=0,0043\text{K}^{-1}$) SE TIENE UNA SENSIBILIDAD DE $0,0341 \times 10^{-8} \text{ } \Omega\text{M/DIVISIÓN}$. PARA $F=200\text{KHZ}$ Y OTROS AJUSTES PREESTABLECIDOS.

Se multiplica la pendiente por las divisiones obtenidas con las probetas del Al 3003 para obtener la variación y la variación relativa de la resistividad, como se aprecia en la tabla N° 11 y figuras N° 34 y 35.

TABLA N° 11. VALORES VARIACIÓN RELATIVA DE LA RESISTIVIDAD. MÉTODO

m ($\Omega \text{ m/div}$)	Div	$\Delta \rho$	Variación Relativa ($\Delta\rho/\rho_0$)	% Recristalización
$- 0,03431 \times 10^{-8}$	5,12	-0.1756×10^{-8}	0	9
$- 0,03431 \times 10^{-8}$	5,3	-0.1818×10^{-8}	-0.0062	10
$- 0,03431 \times 10^{-8}$	5,74	-0.1969×10^{-8}	-0.0213	22
$- 0,03431 \times 10^{-8}$	6,34	-0.2312×10^{-8}	-0.0556	43,63
$- 0,03431 \times 10^{-8}$	7,22	-0.2477×10^{-8}	-0.0721	52,72
$- 0,03431 \times 10^{-8}$	7,34	-0.2518×10^{-8}	-0.0762	80,9
$- 0,03431 \times 10^{-8}$	7,76	-0.2662×10^{-8}	-0.0906	100

RESULTADOS DE LA INVESTIGACION / RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO DE CORRIENTES INDUCIDAS

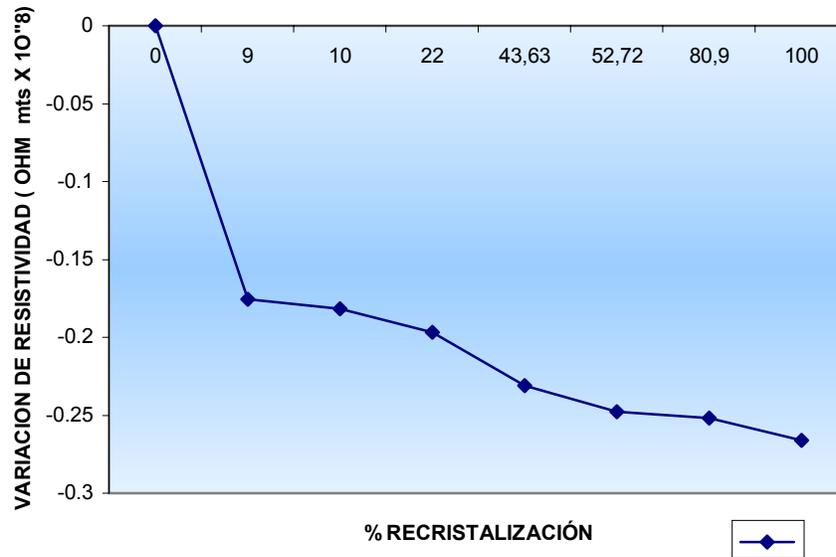


FIGURA N° 34. MÉTODOS DE CORRIENTES INDUCIDAS. VARIACIÓN DE RESISTIVIDAD VS. % RECRISTALIZACIÓN. LOS TRAZOS CONTINUOS SON SIN AJUSTES.

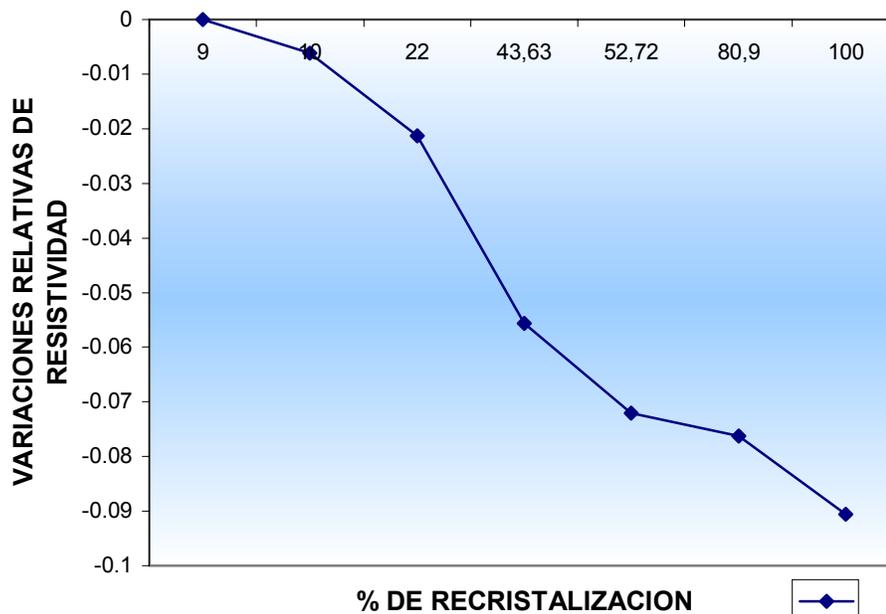


FIGURA N° 35. MÉTODOS DE CORRIENTES INDUCIDAS. VARIACIÓN RELATIVA DE RESISTIVIDAD VS. % RECRISTALIZACIÓN. LA RESISTIVIDAD DISMINUYE CON RELACIÓN AL PORCENTAJE DE RECRISTALIZACIÓN. LOS TRAZOS CONTINUOS SON SIN AJUSTES.

4.7 RESULTADO DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LA FUERZA

Aplicando el método de la fuerza obtenemos los valores mostrados en la Tabla N° 12 y en base a ellos se muestra en figuras N° 36 y N° 37

:

TABLA N° 12 VALORES TENSION VS. RECRISTALIZACIÓN. MÉTODO DE LA FUERZA

% Recristalización	peso (gr.)	Frecuencia (Hz)	Voltaje Vrms (mV)
0%	31.9734	917 ± 2	306
9%	33.0358	917 ± 2	299
10%	31.4528	917 ± 2	298
22%	22.3164	917 ± 2	297.5
43.63%	28.5614	917 ± 2	297
52.72%	26.2078	917 ± 2	297
80.90%	20.1149	917 ± 2	296
100%	24.3364	917 ± 2	294

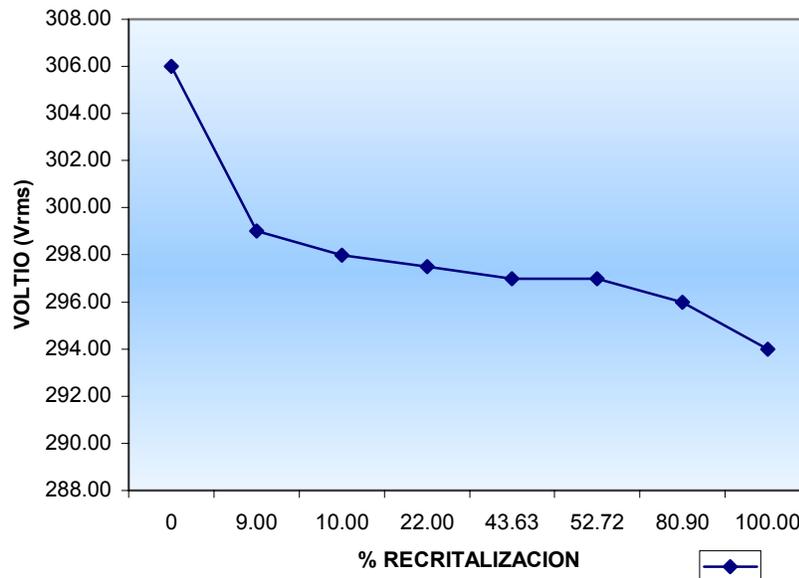


FIGURA N° 36. APLICACIÓN DE TENSIÓN PARA MANTENER LA FUERZA. LOS TRAZOS CONTINUOS SON SIN AJUSTES.

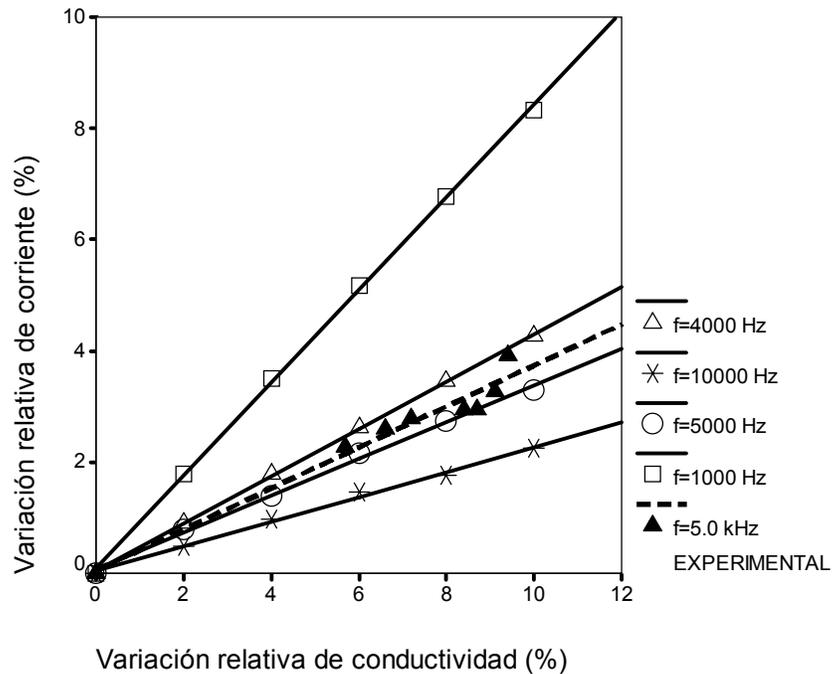


FIGURA N° 37.

En la grafica anterior se muestra la dependencia de la corriente con la conductividad de la probeta, para lograr que la fuerza de interacción alcance un valor dado, para una distancia bobina probeta fija. Los trazos sólidos corresponden a valores calculados. El trazo punteado corresponde al ajuste lineal para datos experimentales tomados a la frecuencia de 5.0 k Hz.

4.8 RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO DE TRANSMISION

La Tabla N° 13 y su figura N° 38 muestra los datos obtenidos por la aplicación del método de transmisión. Obsérvese que para la muestra deformada (0% de recristalización) se requiere mayor tensión en la bobina.

RESULTADOS DE LA INVESTIGACION / RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO DE TRANSMISION

Tabla N° 13. VALORES % RECRISTALIZACIÓN VS. TENSION (mV). MÉTODO TRANSMISIÓN

% Recristalización	Tensión (mV)
0%	47.56
10%	45.91
22%	45.51
43.63%	45.31
52.72%	45.21
100%	45.21

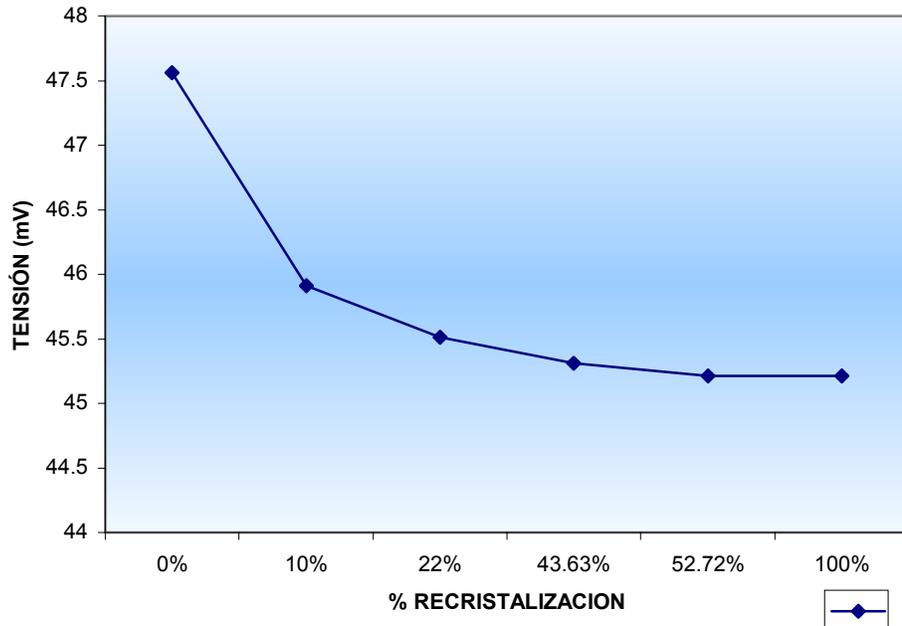


FIGURA N° 38. MÉTODO DE TRANSMISIÓN. VARIACIÓN DE LA TENSION CON EL % DE RECRISTALIZACIÓN. LOS TRAZOS CONTINUOS SON SIN AJUSTES.

4.9- COMPARACION DE RESULTADOS OBTENIDOS:

Finalmente, se compararon los resultados experimentales del método de transmisión con la gráfica teórica de Conductividad Vs. Tensión. (Figura N° 39). Los resultados de resistividad se transformaron en valores de % de tensión para ser contrastados con los valores de conductividad teóricos. (Tabla N° 14).

TABLA N° 14 VALORES % RECRISTALIZACIÓN VS. % CONDUCTIVIDAD TEÓRICA. MÉTODO TRANSMISIÓN

% RECRISTALIZACIÓN	% TENSIÓN	% CONDUCTIVIDAD TEORICA
10	3	2
22	4.3	2.8
43.63	4.7	3
52.22	4.94	3.1
100	4.94	3.1

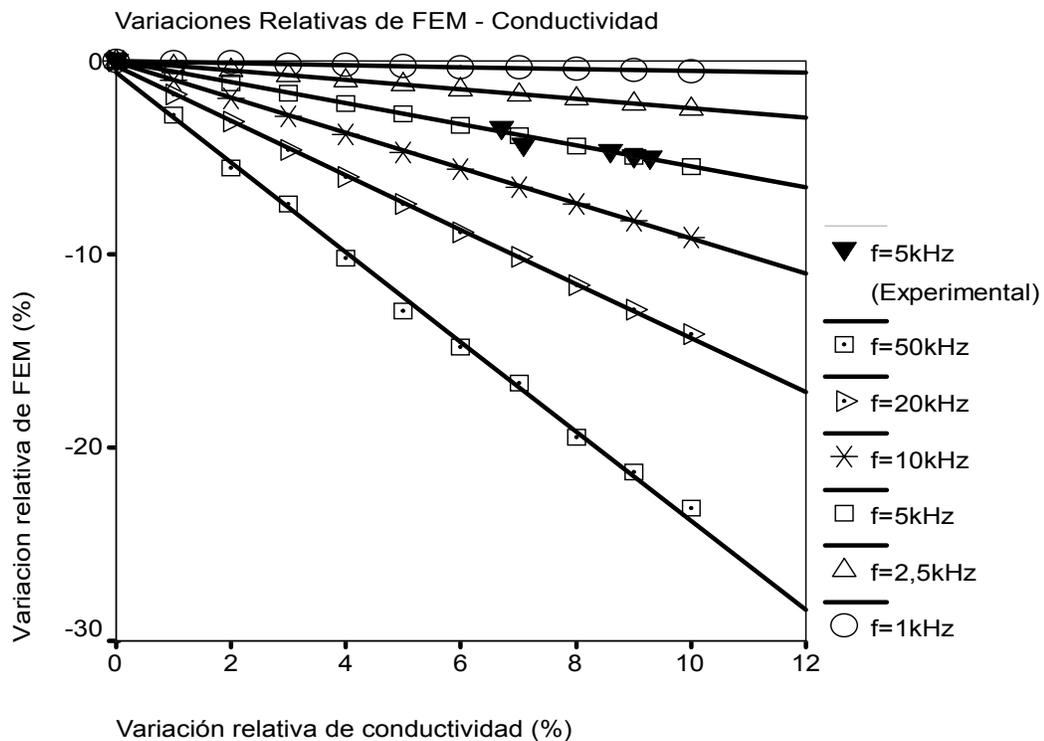


FIGURA N° 39.- VARIACIONES RELATIVAS DE FEM vs. CONDUCTIVIDAD.

 COMPARACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

La grafica muestra la dependencia de las variaciones relativas de Fuerza Electromotriz (*fem*) en la bobina secundaria para diversas frecuencias. Todos los puntos, salvo los correspondientes al triangulo denso, corresponden a valores calculados numéricamente mediante el método de diferencias finitas aplicado a la ecuación:

$$\left(\frac{E_{\theta}}{r^2} - \frac{\partial^2 E_{\theta}}{\partial r^2} - \frac{\partial^2 E_{\theta}}{\partial z^2} - \frac{\partial E_{\theta}}{r \partial r} \right) = -i\mu\sigma\omega E_{\theta} - i\mu\omega J_s$$

utilizando para ello el método Gauss-Seidel, con el fin de simular numéricamente el problema electromagnético con simetría axial, lo cual permite establecer una base experimental y teórica para la medición no destructiva de la conductividad de productos planos.

En la figura N° 40 se ilustra el resultado del método de 4 puntas, aplicado a la determinación de la resistividad del material de las probetas recristalizadas mediante CD, así como el resultado de la calibración del equipo de diagrama de impedancia para una frecuencia de ensayo de 200 k Hz.

COMPARACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

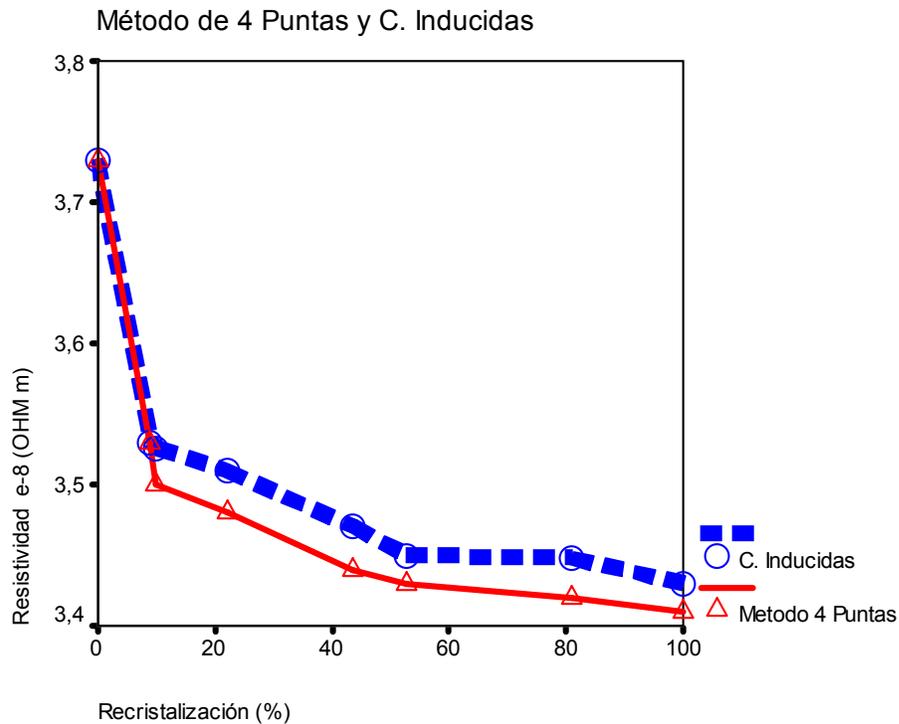


FIGURA N° 40. RESULTADO DE LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DE LAS PROBETAS ENSAYADAS MEDIANTE EL MÉTODO DE CUATRO PUNTAS Y MEDIANTE CORRIENTES INDUCIDAS, PARA LOS DIFERENTES PORCENTAJES DE RECRISTALIZACIÓN. LA FRECUENCIA DEL ENSAYO DE INDUCIDAS ES DE 200 KHZ Y CD PARA EL MÉTODO DE 4 PUNTAS.

4.10 RESULTADO DE LOS CALCULOS DE INCERTIDUMBRE.

DESCRIPCION	INCERTIDUMBRE	INCERTIDUMBRE RELATIVA
Tensión	$\pm 4 \mu v$	1,15 %
Corriente	$\pm 0,0224 A$	1,12 %
Balanza	$\pm 0,1 mg$	0,2 %
Cinta Métrica	$\pm 0,5 mm$	1,2 %
Temperatura	$\pm 0,5 ^\circ C$	
Densidad del material	$\pm 0,01 Kg/m^3$	
Resistividad	$\pm 0,1 \Omega m$	3 %

Dado una Incertidumbre = 0,1 x el factor K=1 para un margen de confiabilidad de 68% , la incertidumbre del calculo de resistividad es $\pm 0,1 \Omega m$

5- DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS:

1. De la Figura 28 podemos ver la variación de la resistividad calculada con el método de las cuatro puntas en función del % de recristalización, medido mediante metalografía óptica cuantitativa. De allí se puede apreciar que la resistividad disminuye a medida que aumenta el % de recristalización. Esto puede observarse a medida que aumenta el grado de recristalización disminuye las imperfecciones en la red cristalina y se facilita la movilidad de los electrones libres. Sin embargo se puede apreciar que existe una variación de la resistividad cuando se pasa de 0% a 100% recristalización. Esto se puede apreciar igualmente en la Figura 29, cuando se gráfica la conductividad vs el % de recristalización, donde se observa una variación de un 10% de la conductividad cuando se varía de 0% a 100% la recristalización.
2. En la Figura 34 se puede apreciar que la variación de la resistividad cuando se aplica el método de corrientes inducidas vs % de recristalización sigue un comportamiento similar al señalado anteriormente, así como se evidencia en la figura 40.
3. De la Figura 36 se puede ver el comportamiento de la corriente cuando se aplica el método de la fuerza vs % de recristalización. Allí se puede observar que a medida que aumenta el % de recristalización la corriente disminuye para mantener la fuerza, lo

DISCUSION DE LOS RESULTADOS

cual es consistente con los resultados obtenidos mediante los otros métodos

4. De la Figura 38 donde se gráfica la tensión lograda por el método de transmisión vs % de recristalización podemos observar nuevamente que la tensión en la bobina disminuye cuando aumenta el % de recristalización.
5. Se puede deducir que los cuatro (4) métodos hay variaciones similares en cuanto a la resistividad. Solo que con el método de transmisión se facilita la realización de la medición tanto en el laboratorio como en la industria.

6- CONCLUSIONES:

- 1) La resistividad eléctrica es un indicador de mecanismos a micro escala, correlacionado con los cambios en las propiedades de las aleaciones sometidas a tratamiento térmico, por consiguiente, es una propiedad esencial a ser determinada para las aplicaciones industriales, así como, para propósitos investigativos.
- 2) Se demuestra que se puede prescindir del método destructivo (4 puntas), ya que aplicando el método de corrientes inducidas se obtiene resultados de similar precisión.
- 3) Los resultados experimentales y su comparación entre los diversos métodos empleados, así como la comparación de los resultados con la simulación numérica del problema electromagnético con simetría axial, permiten establecer una base experimental y teórica para la medición no destructiva de la conductividad de productos planos.
- 4) También se verifico la utilización del coeficiente de temperatura para la resistividad como una manera de obtener una calibración de un equipo de diagrama de impedancia, en base a un material de características conocidas. Las gráficas mostradas suministran información sobre la sensibilidad en función de la frecuencia del ensayo, para cada uno de los métodos utilizados.
- 5) Mediante el presente estudio se pudo determinar que es posible verificar el grado de recristalización en el Aluminio 3003 (H14)

mediante mediciones de resistividad. Se corrobora que existe una correlación negativa entre la recristalización y la resistividad.

- 6) La ampliación del presente estudio permite inferir que es posible elaborar fórmula de la relación Recristalización vs. Resistividad en función del tiempo de recocido, lo cual redundaría en beneficios económicos para la industria metalúrgica, al conocer el grado de recristalización que presenta las láminas de Aluminio 3003 (H14) dependiendo de la resistividad mostrada, sin necesidad de efectuar ensayos destructivos.
- 7) En este trabajo se determinó la dependencia de la fuerza de interacción entre la probeta y la bobina para variaciones relativas de la conductividad. La comparación entre resultados experimentales y simulados indica que la variación de la fuerza de interacción es poco sensible a los cambios de conductividad considerados.
- 8) En cuanto a los métodos empleados, se concluye que el de Transmisión es el más fácilmente realizable, pero éste a partir del 50% de recristalización presenta valores de resistividad similares a los de 100% de recristalización, es por ello que este método no es confiable.
- 9) En cuanto al método de corrientes inducidas se concluye que es el más adecuado, ya que se evidencia durante todo el proceso de recristalización los cambios de resistividad, su aplicación es directa sobre el material y solo requiere la calibración del equipo de inducidas.

-
- 10)** El uso del método de corrientes inducidas para la medición de la resistividad eléctrica en láminas de Aluminio 3003H14, permite obtener el nivel de recristalización asociado, minimizando el tiempo y costo de ensayos tradicionales que redundan en beneficio para la industria del Aluminio.

7- RECOMENDACIONES

- 1) Se recomienda realizar patrones adicionales entre los rangos de conductividad para aleaciones de aluminio.
- 2) Incluir la posibilidad de medir conductividad por capas en los materiales de manera de verificar la variación de la conductividad con la profundidad.
- 3) Realizar patrones para variaciones de conductividad, tomando como referencia la del material utilizado, pudiendo está servir como referencia metrológicas.
- 4) Se podrían aplicar métodos inductivos a piezas tubulares,y barras.

8- BIBLIOGRAFIA

- 1.- ROSSITER y WELL: *Philos. Mag.*, 1971,29, pp. 425-436
- 2.- P.S Liw y K.M Liang: *Mat. Sci and Tech*, 2000,16, pp. 341-343
- 3.- S. Ames y A. Mc Quillan: *Asta Metalúrgica*, Vol. 4, Nov 1.956, pp. 619-626.
- 4.- M. Ikeda, S. Komatsu, K. Inoue, H. Shiota, and T. Imose: *Materials Science and Techology*, Vol. 16, June 2000, pp 605-608.
- 5.- ANSI/ ASTM B 193-87: *Standard Test Method for, Resistivity of electrical conductor materials*
- 6.- ANSI/ ASTM B63-90: *Standart Test Method for Resistivity of Metallically Conducting Resistance and Contact Materials.*
- 7.- INTA. *Capítulo 5, Corrientes Inducidas*, pp. 508.
- 8.- Robert E. Reed-Hill: *Principio de Metalurgia Física*
- 9.- William D. Cooper, Albert D Helfrick: *Instrumentación Electrónica Moderna y Técnica de Medición*, pp 108-110.
- 10.- Gorelik, S.S., *Recrystallization in Metal and Alloys*, Publicaciones Mir, Moscu. *Primera publicación en Inglés.* (1981).
- 11.- V.S Cecco, G Van Drunen and F.L Sharp. *Año 1983*, pp 33-49.
- 12.- Reitz. Milford. Chisty: *Fundamentos de la Teoría Electromagnética*, pp 149-150

-
- 13.- E.E. Kriezis, Theodoros D. Tsiboukis, Stavros M. Panas y A Tegopoulos.
Hedí Currents: *Theory and applicationns*, en: *Proceeding of the IEEE*,
Vol 80, No.10, Octubre 1992.
- 14.- Jill A Ogilvy, Chris C. Holt y David J. Mackeith: *Eddy Current NDE theory
and experiment*, en: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive
Evaluation, Vol 10A. Editado por D.O. Thompson y D.E. Chimenti, Plenum
Press, New York, 1991.*
- 15.- Constatine. A Balanis: *ADVANCED ENGINEERING
ELECTROMAGNETICS*; John Willey & Sons, New Yirk 1989.
- 16.- John D. Jackson: *ELECTRIDINAMICA CLASICA*, Edit. Alhambra, Madrid
1981, Pág. 304,343.
- 17.- John D. Jackson: *ELECTRIDINAMICA CLASICA*, Edit. Alhambra, Madrid
1981, Pág. 227.
- 18.- L.D Landau y F.M Lifsshitz: *Electrodinámica de los Medios Continuos*,
Editorial Reverté, México 1975, Pág. 222.
- 19.- John D. Jackson: *ELECTRIDINAMICA CLASICA*, Edit. Alhambra, Madrid
1981, Pág. 17,195
- 20.- L.D Landau y F.M Lifsshitz: *Electrodinámica de los Medios Continuos*,
Editorial Reverté, México 1975, Pág. 223.
- 21.- Weng Cho Chew : *WEVE AND FIELDS IN INHOMOGENEOUS MEDIA*;
Van Nostrand Reinhold, New york 1990.
- 22.- Dale H. Bester Field. Editorial Prentice Hall. Hispanoamericana

NORMATIVAS ESTABLECIDAS POR LA ASTM B193-87 PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD CD

El método permite la determinación de la resistividad eléctrica de un metal conductor con una precisión de $\pm 0.30\%$ en una muestra con una resistencia de 0.00001 ohm o mas.

Características que deben tener las Probetas:

- Una resistencia de 0.00001 ohm, entre los potenciales de contacto.
- Una longitud no menor de 300 mm.
- El ancho o diámetro depende de la resistencia de la medición del instrumento.
- La superficie no debe tener grietas o defectos visibles y libre de oxido, sucio y grasas
- No debe ser deformada por pedazos.

Procedimientos:

Para determinar las dimensiones y pesos se puede realizar con un instrumento de precisión con rango de $\pm 0.05\%$, para asegurar la medición de largo entre los contactos del potencial.

La superficie en contacto con el espécimen puede ser de punta afilada cuando se usa el puente de Kelvin o potenciómetro.

Dimensiones de la sección cortadas se determinan por medio de un micrómetro con números de mediciones para tomar un promedio dentro del

+/- 0.10%. En el caso que sea de menor de 0.100 pulg. (2.54 mm) se deberá determinar mediante el peso, densidad y largo del espécimen.

Características de una Probeta de Material Dúctil:

- Este método cubre una precisión del 2%.
- La probeta debe tener una longitud mayor a 30 cm.
- La resistencia de por lo menos 0,001 Ohm.
- Area seccional el diámetro o espesor no debe ser menor de 1,3 mm, la misma no debe variar del 3%.