

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**“ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN MICROESTRUCTURAL EN EL
ALUMINIO 6063 SOMETIDO A TRABAJO EN FRÍO Y POSTERIOR
PROCESO DE RECUPERACIÓN Y RECRISTALIZACIÓN”**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Nogueira D., Fabio D
Requena I., Desiree
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN MICROESTRUCTURAL EN EL ALUMINIO 6063 SOMETIDO A TRABAJO EN FRÍO Y POSTERIOR PROCESO DE RECUPERACIÓN Y RECRISTALIZACIÓN”

TUTOR ACADÉMICO: Prof. José Chitty.

CO-TUTOR ACADÉMICO: Prof. Carlos González.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Nogueira D., Fabio D
Requena I., Desiree
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2008

Caracas, Noviembre, 2008.

ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres **Desiree Requena** y **Fabio Nogueira**, intitulado

“Evolución Microestructural en el Aluminio 6063 con Distintos Porcentajes de Deformación en Frío y Posterior Proceso de Recuperación y Recristalización”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos en el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores.



Prof. Crisanto Villalobos
Jurado



Prof. ^(a) María de los A. Rodríguez
Jurado


Prof. José Chitty
Tutor Académico

DEDICATORIA

A mis padres, Rafael y Flor, en especial a mi madre por su infinito apoyo, por creer en mí y en cada decisión que tomé, y a mi padre por su apoyo incondicional y esperar siempre de mí lo mejor.

A mi Amiga y mi hermana Nayrovi, porque siempre haz sabido como ser una persona super especial conmigo. Agradezco infinitamente tu amistad y tu apoyo.

A mis hermanos Aristely y Marcos, por estar presentes en el trayecto de esta importante meta. Y además a mi cuñado César que adoro, porque es una persona muy especial y siempre me ofreció sus buenos deseos.

A mi sobrino Juan Marcos, porque no deja de parecerme la personita más especial que he visto, y de solo pensarlo me llena de felicidad y de mucho ánimo.

A mis amigos de la Escuela de mecánica (Gaby, Alejandro, Lemir, Carlitos, Frank, etc) y mis compañeros de estudio, por compartir el logro de esta meta. Los aprecio mucho.

Además de mis amigos (Ariadnita, Angela, Jody, etc) por compartir además de esta satisfacción, muchos otros momentos de felicidad durante mi carrera.

Desiree Requena I.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres por su apoyo incondicional y por haberme ayudado a alcanzar esta meta. A mi madre por haber estado siempre conmigo en los momentos difíciles motivándome a seguir y brindándome sus consejos; y a mi padre por creer en mí y por haber hecho todo lo posible para que yo saliera adelante.

A mi hermanita por haberme soportado tanto y por compartir conmigo los momentos buenos y malos que pasé durante toda mi carrera.

A todos mis familiares, compañeros y amigos que siempre me preguntan cuando me voy a graduar, en general a todos aquellos que están pendientes y se preocupan por mí.

A la persona más especial que haya conocido en mi vida, mi abuelita Cristininha, por haber sido desde el principio de este trabajo mi mayor motivación para culminar con éxito y poder estar con ella acompañándola en sus últimos días.

Fabio D. Nogueira D.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios, por darnos en cada momento de nuestras vidas la fortaleza para salir de las dificultades y sentir que la fe en las metas que nos proponemos es más fuerte que las adversidades.

Le agradecemos a nuestros tutores, los Profesores José Chitty y Carlos González, por guiarnos en el logro de los objetivos de este proyecto. Por brindarnos su tiempo y sus consejos para llevar a buenos términos esta investigación.

Al Profesor Crisanto Villalobos por asesorarnos en la realización de actividades y facilitarnos los recursos para llevar a cabo este trabajo.

A los Profesores Francisco Garcés, César Peñuela y los técnicos del IMME por asistirnos en la realización de actividades y ofrecernos su tiempo y ayuda.

A todos nuestros amigos de la facultad de Ingeniería y compañeros de estudio. Por compartir este sueño, y también la felicidad y la gratificación de verlo hecho realidad.

Los autores.

Nogueira D, Fabio D., Requena I, Desiree.

**ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN MICROESTRUCTURAL EN EL ALUMINIO
6063 SOMETIDO A TRABAJO EN FRÍO Y POSTERIOR PROCESO DE
RECUPERACIÓN Y RECRISTALIZACIÓN.**

**Tutor Académico: Prof. José Chitty., Co-Tutor Académico: Prof. Carlos
González. Tesis. Caracas, UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería
Mecánica. Año 2008, 115 p.**

Palabras Claves: ALUMINIO 6063, TRABAJO EN FRÍO, RECUPERACIÓN,
RECRISTALIZACIÓN, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, CORRIENTES
INDUCIDAS, METALOGRAFÍA.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo especial de grado fue el de evaluar la evolución microestructural en el Aluminio 6063 con distintos porcentajes de deformación en frío y posterior proceso de recuperación y recristalización. Para llevar a cabo dicho estudio se aplicaron ensayos de Corrientes Inducidas y el método del voltímetro-amperímetro para medir las propiedades eléctricas; y ensayos de dureza para medir las propiedades mecánicas, finalmente se buscó una correlación entre estas propiedades. Las propiedades mecánicas se modificaron mediante trabajo en frío (ensayos de tracción) y tratamientos térmicos con distintos periodos de tiempo. Finalmente se realizó un estudio metalográfico para examinar la estructura de grano.

Los resultados evidenciaron que a medida que se aumenta el porcentaje de deformación en frío, aumenta la dureza del material mientras que disminuye la conductividad eléctrica. También, a medida que el material se somete al tratamiento térmico por un lapso de tiempo mayor la dureza disminuye y la conductividad aumenta, siendo los cambios más significativos en el material con mayor deformación.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS METALES.	4
2.1.1 Características de las dislocaciones.	5
2.1.2 Propiedades a la Tracción.	5
2.1.2.1 Esfuerzo a la Tracción.....	8
2.1.2.2 Ductilidad.....	9
2.1.3 Energía asociada a la deformación mecánica.	11
2.1.4 Recuperación elástica durante la deformación plástica.	11
2.1.5 Endurecimiento por Deformación.	12
2.2 DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES POLICRISTALINOS. ..	15
2.3 CINÉTICA DE LAS REACCIONES DE ESTADO SÓLIDO.	18
2.3.1 Tratamientos térmicos de Recocido y Recristalización.	19
2.3.1.1 Recuperación o Liberación de tensiones.....	21
2.3.1.2 Recristalización.....	22
2.3.1.3 Crecimiento de grano.	27
2.4 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS METALES.	33
2.4.1 Conductividad eléctrica y propiedades mecánicas.	34
2.4.2 Métodos para determinar la Conductividad Eléctrica.	35
2.4.2.1 Método de Voltímetro-Amperímetro (método de las 4 puntas).....	35
2.4.2.1.1 Resistividad de Volumen.	36
2.4.2.2 Método de corrientes inducidas (Corrientes de Eddy).....	37
2.4.2.2.1 Mediciones de conductividad eléctrica y diferenciación de materiales no magnéticos.....	39
2.4.2.3 Conductividad estratificada.....	42
2.5 ALUMINIO Y SUS ALEACIONES. PROPIEDADES.	43
2.5.1 Designación de las aleaciones de aluminio en bruto.	44

2.6	TRATAMIENTO TÉRMICO DE ALEACIONES DE ALUMINIO.....	45
2.6.1	Tratamiento térmico de solubilización.....	45
2.6.2	Fundamentos del tratamiento térmico de envejecimiento.	46
2.7	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN MICROSCÓPICA DE LA ESTRUCTURA DE LOS METALES Y ALEACIONES.....	47
3.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	49
3.1	PROBETAS.....	49
3.2	ENSAYO DE TRACCIÓN.....	52
3.3	MEDICIONES DE CONDUCTIVIDAD.....	55
3.3.1	Medición de conductividad eléctrica por el método de las cuatro (4) puntas.....	55
3.3.1.1	Procedimiento.....	55
3.3.2	Mediciones de Conductividad mediante el método de corrientes inducidas (Corrientes de Eddy).....	58
3.3.2.1	Variables tomadas en cuenta para garantizar una evaluación precisa de la conductividad eléctrica.....	58
3.3.2.2	Estandarización y calibración.....	60
3.3.2.3	Procedimiento.....	62
3.3.3	Mediciones de conductividad estratificada.....	64
3.3.3.1	Procedimiento.....	64
3.4	TRATAMIENTOS TERMICOS.....	66
3.5	ENSAYO DE DUREZA.....	67
3.6	EVALUACIÓN METALOGRÁFICA.....	68
4.	RESULTADOS Y ANALISIS.....	71
4.1	ENSAYO DE TRACCIÓN.....	71
4.2	MEDICIONES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.....	73
4.2.1	Método de las 4 puntas.....	73
4.2.1.1	Conductividad en la dirección de la deformación.....	73
4.2.1.2	Conductividad en dirección transversal.....	75
4.2.2	Método de Corrientes de Eddy.....	78

4.2.2.1	Medición de la conductividad eléctrica a las probetas sin tratamiento térmico.....	78
4.2.2.2	Medición de la conductividad eléctrica a las probetas con tratamiento térmico.	81
4.2.3	Conductividad Estratificada.....	84
4.3	MEDICIÓN DE DUREZA.....	85
4.3.1	Medición de dureza para las probetas sin tratamiento térmico.	85
4.3.2	Medición de dureza para las probetas con tratamiento térmico.	88
4.4	ENSAYO METALOGRAFICO.....	91
5.	CONCLUSIONES.....	99
6.	RECOMENDACIONES.....	101
	BIBLIOGRAFÍA.....	102
	APÉNDICE DE TABLAS	105
	APENDICE A (Ensayo de Tracción):	105
	APENDICE B (Método de las 4 puntas-Dirección longitudinal):	107
	APENDICE C (Método de las 4 puntas-Dirección transversal):.....	109
	APENDICES D y E (Método de Corrientes Inducidas):.....	112
	APENDICE F (Ensayo de dureza).	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.1. <i>Esquema de una dislocación de borde</i>	5
Figura 2.1.2.1. <i>Curva esfuerzo- deformación que muestra la transición elástico-plástico</i>	6
Figura 2.1.2.2. <i>Curva de esfuerzo- deformación que muestra la fluctuación del punto mínimo de fluencia</i>	7
Figura 2.1.3. <i>Curva esfuerzo- deformación que muestra el punto que corresponde al Esfuerzo máximo y de fractura</i>	8
Figura 2.1.4. <i>Curva esfuerzo-deformación para materiales dúctiles y frágiles</i>	9
Figura 2.1.5. <i>Curva esfuerzo-deformación que muestra la deformación elástica recuperada durante el ensayo de tracción</i>	12
Figura 2.1.6. <i>Para el acero 1040, latón, y cobre, (a) Aumento del esfuerzo de fluencia, (b) Aumento de la resistencia a la tracción. Para el acero 1040, latón, y cobre, (c) Disminución de la ductilidad (EL%) con varios porcentajes de trabajo en frío</i>	13
Figura 2.1.6.1. <i>Influencia del trabajo en frío en el comportamiento de un acero de bajo carbono sometido a tensión</i>	14
Figura 2.2.1. <i>Líneas de deslizamiento para una especie de cobre policristalino que fue pulido y luego deformado 173x</i>	16
Figura 2.2.2. <i>Alteración de la estructura de grano de un metal policristalino como resultado de la deformación plástica</i>	17
Figura 2.3. <i>Fracción de material transformado versus el logaritmo del tiempo, típico de muchas transformaciones de estado sólido, en las cuales se mantiene constante la temperatura</i>	19
Figura 2.3.1. <i>Fotomicrografías que muestran varias etapas de la recristalización y el crecimiento de grano del latón</i>	24
Figura 2.3.2. <i>La influencia de la temperatura de recocido en la resistencia a la tracción y ductilidad de una aleación de latón. Se indicó el tamaño de grano como función de la temperatura de recocido</i>	26

Figura 2.3.3. <i>Variación de la temperatura de recristalización con el porcentaje de trabajo en frío del hierro. Para deformaciones menores de la crítica (alrededor de 5% CW), la recristalización no se produce.....</i>	27
Figura 2.3.4. <i>Representación esquemática del crecimiento de grano a través de la difusión atómica.....</i>	29
Figura 2.3.5. <i>Gráfica tamaño de grano-tiempo de recocido que muestra la relación de estas dos variables con la temperatura de recocido.....</i>	30
Figura 2.3.6. <i>Curva que muestra la tendencia del crecimiento de grano respecto al porcentaje de deformación en el material.....</i>	31
Figura 2.3.7. <i>Logaritmo del diámetro de grano versus el logaritmo del tiempo para el crecimiento de grano del bronce a varias temperaturas.....</i>	33
Figura 2.4.2.1 <i>Esquema de la bobina de corrientes inducidas sobre una placa de material conductor.....</i>	38
Figura 2.4.2.2. <i>Curvas de conductividad eléctrica en porcentaje de IACS.....</i>	41
Figura 2.6.1. <i>Diagrama de fase para la aleación Al-Mg-Si.....</i>	46
Figura 3.1.1. <i>Probetas para los ensayos de tracción.....</i>	50
Figura 3.1.2. <i>Probetas para deformación a porcentaje específico.....</i>	50
Figura 3.1.3. <i>Maquinado de probeta para deformación.....</i>	51
Figura 3.1.4. <i>Probetas maquinadas para los tratamientos térmicos y mediciones de conductividad.....</i>	51
Figura 3.2.1. <i>Máquina de ensayos universales de la EIM.....</i>	52
Figura 3.2.2. <i>Máquina de ensayos del IMME.....</i>	53
Figura 3.2.3. <i>Probeta N°3 sometida a tracción para una deformación de 7,8%.....</i>	53
Figura 3.2.4. <i>Reloj de la máquina de tracción del IMME que muestra la carga de 7000 Kgf aplicada a la probeta N° 3.....</i>	54

Figura 3.2.5. <i>Probetas sometidas a un ensayo de tracción para obtener la curva esfuerzo-deformación del material</i>	54
Figura 3.3.1. (a). <i>Esquema general del método de las 4 puntas.</i> (b). <i>Probeta sobre dos láminas de bronce las cuales garantizan una distribución homogénea de la corriente a través de la misma. Sobre esta se encuentran las cuchillas entre las cuales se mide la diferencia de potencial</i>	56
Figura 3.3.2. <i>Multímetros para la medición de corriente (superior) y diferencia de potencial (inferior)</i>	57
Figura 3.3.3. <i>Gráfica de diferencia de Temperatura- voltaje de la termocupla T (cobre-constantan)</i>	60
Figura 3.3.4. <i>Gráfico que resultó de la calibración del Equipo de corrientes inducidas</i>	61
Figura 3.3.5 (a). <i>Equipo de corrientes inducidas.</i> (b). <i>Bobina del equipo de corrientes inducidas sobre una probeta de aluminio</i>	62
Figura 3.3.6. <i>Medición de la probeta 6063 sin T6 respecto a la referencia 6063T6. Se muestran las curvas de lift-off para los materiales</i>	63
Figura 3.3.7 <i>Montaje para la medición de conductividad estratificada</i>	65
Figura 3.3.8. <i>Disposición para la captura de datos experimentales. Los círculos concéntricos representan equipotenciales</i>	65
Figura 3.3.9. <i>Medición de conductividad estratificada</i>	65
Figura 3.4.1. <i>Horno del laboratorio de metalografía de la EIM</i>	66
Figura 3.5.1. <i>Durómetro del laboratorio de lubricación y desgaste de la EIM</i>	66
Figura 3.6.1. (a) <i>Equipo de pulido en forma manual,</i> (b) <i>Equipo de pulido con plato giratorio</i>	69
Figura 3.6.2. <i>Muestras después de ser pulidas para el ensayo metalográfico</i>	69

Figura 3.6.3. <i>Microscopio del laboratorio de nuevos materiales de la Escuela de Ingeniería metalúrgica</i>	70
Figura 4.1.1. <i>Curvas de esfuerzo-deformación para las 4 probetas ensayadas</i>	71
Figura 4.1.2. <i>Curva esfuerzo-deformación promedio</i>	72
Figura 4.2.1. <i>Gráfica que muestra la tendencia de la conductividad con el aumento de la deformación</i>	74
Figura 4.2.2. <i>Gráfica que muestra el cambio relativo de la conductividad respecto al porcentaje de deformación</i>	74
Figura 4.2.3. <i>Gráfica que muestra la tendencia de la conductividad en dirección transversal a la deformación</i>	76
Figura 4.2.4. <i>Gráfica que muestra el cambio relativo de la conductividad en dirección transversal respecto al porcentaje de deformación</i>	76
Figura 4.2.5. <i>Gráfica que muestra la tendencia de la conductividad por el método de las 4 puntas tanto en dirección longitudinal como en la transversal</i>	77
Figura 4.2.6. <i>Gráfica que muestra la tendencia de la conductividad por el método de corrientes inducidas</i>	79
Figura 4.2.7. <i>Gráfica que muestra el cambio relativo de la conductividad respecto al porcentaje de deformación por el método de corrientes inducidas</i>	79
Figura 4.2.8. <i>Gráfico comparativo del incremento relativo de la conductividad para diferentes porcentajes de deformación</i>	80
Figura 4.2.9. <i>Gráfico de la conductividad de las probetas tratadas térmicamente en relación con el tiempo de tratamiento</i>	83
Figura 4.2.10. <i>Gráfica del incremento relativo porcentual de la conductividad respecto al tiempo de tratamiento térmico</i>	84
Figura 4.3.1.1. <i>Gráfica que muestra la dureza respecto al porcentaje de deformación</i>	86

Figura 4.3.1.2. <i>Gráfica que muestra la dureza y la resistividad en la dirección de la deformación respecto al porcentaje de deformación.....</i>	87
Figura 4.3.2. <i>Gráfica que muestra el comportamiento de la dureza respecto a los tiempos de tratamiento térmico.....</i>	89
Figura 4.3.3. <i>Gráfica que muestra el comportamiento de la dureza y la resistividad respecto a los tiempos de tratamiento térmico.....</i>	90
Figura 4.4.1. <i>Material original (Aluminio 6063T6).....</i>	91
Figura 4.4.2. <i>Material solubilizado.....</i>	91
Figura 4.4.3. <i>Probeta con 4,2% de deformación. HF (2%).....</i>	92
Figura 4.4.4. <i>Probeta 3.- 4,2% de deformación. ½ hora de TT. HF (2%).....</i>	92
Figura 4.4.5. <i>Probeta 3.- 4,2% de deformación. 1 hora de TT. HF (2%).....</i>	93
Figura 4.4.6. <i>Probeta 3.- 4,2% de deformación. 3 horas de TT. HF (2%).....</i>	93
Figura 4.4.7. <i>Probeta 1.- 7,8% de deformación. HF (2%).....</i>	94
Figura 4.4.8. <i>Probeta 1.- 7,8% de deformación con ½ hora de TT. HF (2%).....</i>	94
Figura 4.4.9. <i>Probeta 1.- 7,8% de deformación con 1 hora de TT. HF (2%).....</i>	95
Figura 4.4.10. <i>Probeta 1.- 7,8% de deformación con 3 horas de TT. HF (2%).....</i>	95
Figura 4.4.11. <i>Probeta 2.- 10,6% de deformación. HF (2%).....</i>	96
Figura 4.4.12. <i>Probeta 2.- 10,6% de deformación con ½ hora de TT. HF (2%).....</i>	96
Figura 4.4.13. <i>Probeta 2.- 10,6% de deformación con 1 hora de TT. HF (2%).....</i>	97
Figura 4.4.14. <i>Probeta 2.- 10,6% de deformación con 3 horas de TT. HF (2%).....</i>	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.1. <i>Composición Química del Aluminio 6063 según la ASM Internacional</i>	49
Tabla 4.1. <i>Reporte para la deformación de las probetas a evaluar</i>	72
Tabla 4.2.1.1. <i>Reporte de resistividad y conductividad promedio para las probetas deformadas en dirección longitudinal</i>	73
Tabla 4.2.1.2. <i>Reporte de resistividad y conductividad promedio para las probetas deformadas en dirección transversal</i>	75
Tabla 4.2.2.1. <i>Reporte de conductividad promedio por corrientes inducidas</i>	78
Tabla 4.4.2.2. <i>Valores de conductividad para las probeta 1 con tratamiento térmico por corrientes inducidas</i>	82
Tabla 4.4.2.3. <i>Valores de conductividad para las probeta 2 con tratamiento térmico por corrientes inducidas</i>	82
Tabla 4.4.2.4. <i>Valores de conductividad para las probeta 3 con tratamiento térmico por corrientes inducidas</i>	83
Tabla 4.3.1. <i>Valores promedio de las mediciones de dureza para el material original, solubilizado y trabajado en frío</i>	85
Tabla 4.3.2.1. <i>Valores promedio de las mediciones de dureza para la Probeta 1 con distintos periodos de tratamiento térmico</i>	88
Tabla 4.3.2.2. <i>Valores promedio de las mediciones de dureza para la Probeta 2 con distintos periodos de tratamiento térmico</i>	88
Tabla 4.3.2.3. <i>Valores promedio de las mediciones de dureza para la Probeta 3 con distintos periodos de tratamiento térmico</i>	88

1. INTRODUCCIÓN

Comúnmente las propiedades mecánicas del metal se caracterizan por las siguientes magnitudes: 1.- resistencia, por la cual se entiende la resistencia del metal a la deformación y 2.- plasticidad, es decir, la capacidad del metal de adquirir deformación remanente (que se conserva aún después de que las fuerzas deformantes dejan de ser aplicadas) sin que se destruya.

Una pequeña plasticidad o la carencia total de ella se denomina fragilidad. Como resultado de las pruebas mecánicas se obtienen los valores numéricos de las propiedades mecánicas, es decir, los valores de las tensiones o deformaciones con las cuales se modifica el estado físico del material.

Se llama deformación al cambio de las dimensiones y la forma de la materia bajo la acción de las fuerzas aplicadas.

Las propiedades mecánicas dan la posibilidad a los constructores y materialistas de establecer en que límites de cargas y en que condiciones este material puede ser empleado. Las pruebas mecánicas se emplean ampliamente para el control de la calidad de fabricación y elaboración del metal y elementos metálicos en las fábricas metalúrgicas y metalmecánicas.

La conductividad eléctrica de un material es una propiedad física que representa la condición inversa de la resistividad eléctrica. Por lo tanto es la facilidad con la cual un material conduce la corriente. Esta propiedad puede ser correlacionada directamente con las propiedades mecánicas del material.

Las propiedades mecánicas y eléctricas de los metales son afectadas de manera adversa por defectos que se conocen como dislocaciones, las cuales se presentan en el arreglo ordenado de la estructura atómica del metal y cuando se hacen presentes en

forma desordenada en las fronteras de grano le conceden al metal mayor resistencia a la deformación.

El seguimiento de la evolución microestructural y de los cambios en la conductividad eléctrica que ocurren debido a procesos térmicos como los de recuperación y recristalización son de fundamental importancia para el aseguramiento de la calidad del producto final. Los periodos de tiempo para los tratamientos térmicos y los rangos de temperatura determinan el grado de recuperación del material que fue deformado previamente, respecto a propiedades como resistencia mecánica, dureza y plasticidad. Y dichos cambios pueden ser cuantificados y caracterizados al ser relacionados con la conductividad eléctrica medida.

En la industria surge cada día más la necesidad de controlar los niveles de calidad de los productos con técnicas confiables. Es por ello que se implementan procedimientos de inspección cada vez más rigurosos que proporcionen resultados acertados, en particular el uso de técnicas no destructivas, que permiten incluso la inspección del 100% de una línea de producción. Uno de estos casos lo representa sin duda la caracterización de las condiciones de deformación y la evolución microestructural que ocurre en un material durante su conformado en frío.

La caracterización cuantitativa de microestructuras usando métodos no destructivos de evaluación es de gran interés práctico, esencialmente porque la microestructura deseada en los productos y componentes fabricados se puede garantizar de forma fiable y de manera rápida.

El ensayo no destructivo de Corrientes de Eddy se está utilizando ampliamente para la caracterización de las microestructuras, en la última década se han realizado grandes progresos en los aspectos teóricos y prácticos relacionados a este método. Se han caracterizado tratamientos térmicos como el envejecimiento a distintos períodos

de tiempo de tratamiento que generan distintas microestructuras con variaciones en sus propiedades mecánicas como resistencia a la deformación e impacto.

La importancia de llevar a cabo esta investigación práctica radica en la necesidad de caracterizar mediante un ensayo no destructivo un material con tan amplio campo de aplicaciones como es la aleación de aluminio 6063. Realizar un estudio de su comportamiento en la evolución microestructural a medida que se trabaja en frío y se somete a tratamientos térmicos, permite caracterizar este material en un proceso general de conformado sin la necesidad de interrumpir el proceso de producción y garantizando en general un control de calidad efectivo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS METALES.

Para la mayoría de los metales, la deformación elástica persiste hasta que se alcanzan deformaciones de entre 0,001 y 0,005 aproximadamente. A medida que el material se deforma más allá de este punto, la deformación se vuelve permanente, se produce la deformación plástica.

Como producto de la deformación plástica, el material se hace progresivamente más resistente, aumenta su resistencia a la tracción y dureza, además de que disminuye su ductilidad.

Desde una perspectiva atómica, la deformación plástica puede interpretarse como la ruptura de lazos entre los átomos vecinos originales que luego se apegan a los nuevos átomos adyacentes. [1]

Las dislocaciones son defectos unidimensionales en el ordenamiento de átomos que se manifiestan como líneas. Estas líneas se deslizan sobre planos cristalinos de la estructura cuando se aplica esfuerzo al metal, lo cual provoca la deformación plástica (ver figura 2.1.1) [2].

Cuando el metal es deformado en frío su dureza y resistencia aumentan debido a que aumenta la densidad de dislocaciones, la densidad de dislocaciones típica para un material en estado de recocido está entre 10^5 y 10^6 cm^{-2} , sin embargo, esta densidad puede llegar a valores entre 10^{10} a 10^{12} cm^{-2} en materiales deformados en frío, por lo que experimentan mayor dificultad para deslizarse y lo hacen en proporciones muy limitadas bajo esfuerzos muy grandes. Es importante señalar que la estructura que estas dislocaciones adquieren y no sólo su densidad, desempeña también un papel importante en el endurecimiento. La estructura de las dislocaciones es dependiente de la temperatura y de la forma o estado de esfuerzo aplicado. [3]

2.1.1 Características de las dislocaciones.

Varias características de las dislocaciones son importantes en lo que respecta a las propiedades mecánicas de los metales, estas incluyen los campos de deformación que existen en torno a las dislocaciones, que son influyentes en la determinación del movimiento de las mismas, así como en su capacidad de multiplicarse.

Cuando los metales son deformados plásticamente, una fracción de la energía de deformación se mantiene internamente; el resto se disipa en forma de calor. Gran parte de esta energía es almacenada como energía asociada a las dislocaciones.

La tensión en torno a los campos de dislocaciones en estrecha proximidad el uno con el otro pueden interactuar de manera que las fuerzas se imponen en cada dislocación por interacciones combinadas de todas las dislocaciones vecinas. [1]

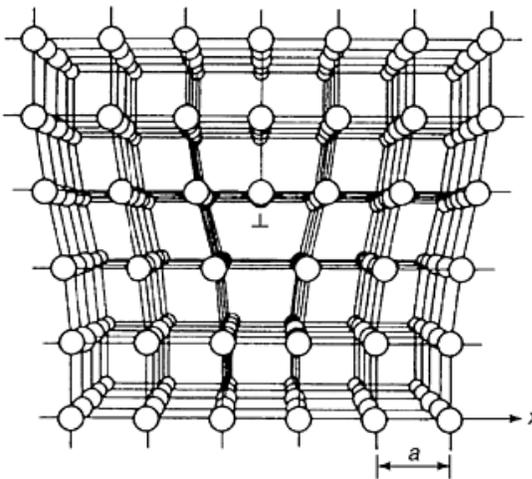


Figura 2.1.1. Esquema de una dislocación de borde [2].

2.1.2 Propiedades a la Tracción.

La mayoría de las estructuras están diseñadas para asegurar que cuando se aplica un esfuerzo sólo habrá deformación elástica. Por lo tanto, es conveniente conocer el nivel de esfuerzo en que comienza la deformación plástica, o cuando el fenómeno de cedencia se produce [3]. Se entiende por esfuerzo la carga aplicada por unidad de área

de sección transversal (Ecuación 2.1). Para los metales que experimentan una transición gradual elástico-plástico, el punto de cedencia puede ser determinado como aquel donde la curva esfuerzo-deformación sale de la linealidad, lo que es a veces llamado el límite proporcional, como se indica en el punto P en la Figura 2.1.2.1. Se ha encontrado que muchos materiales presentan cierto grado de elasticidad aún después de exceder el límite de proporcionalidad, en tales casos el límite elástico no puede ser determinado con precisión. Como consecuencia de ello, una convención que se ha establecido es que se construye una línea recta paralela a la porción elástica de la curva esfuerzo-deformación partiendo de un punto de deformación determinado, por ejemplo la norma ASTM E38 sugiere un valor de 0,002. El esfuerzo correspondiente a la intersección de esta línea y la curva esfuerzo-deformación, que corresponde a la región plástica, se define como el Esfuerzo de fluencia. [1]

$$\sigma = F/A \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

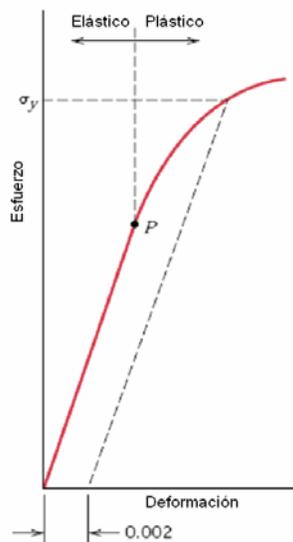


Figura 2.1.2.1. Curva esfuerzo-deformación que muestra la transición elástico-plástico [1].

Para aquellos materiales que tengan una región elástica no lineal, el uso del método anterior no es posible, y la práctica habitual es definir el esfuerzo de fluencia

como el esfuerzo necesario para producir una cierta cantidad de deformación (por ejemplo, 0.005).

Algunos materiales como el acero, muestran una transición elástico-plástica que se produce luego de la fluctuación en el límite de fluencia, a lo que se denomina fenómeno del punto de fluencia. Sobre el punto de fluencia la deformación plástica se inicia con una disminución en el esfuerzo, a continuación la deformación fluctúa ligeramente sobre algún valor constante de esfuerzo, llamado el punto de fluencia inferior; posteriormente la deformación aumenta con el creciente esfuerzo (figura 2.1.2.2).

La magnitud del esfuerzo de fluencia para un metal es una medida de su resistencia a la deformación plástica. El esfuerzo de fluencia puede presentar variaciones importantes en los materiales, así se puede encontrar valores de 35 MPa (5000 psi), para un aluminio de baja resistencia, y también de hasta 1400 MPa (200000 psi) que corresponde a un acero de alta resistencia. [1]

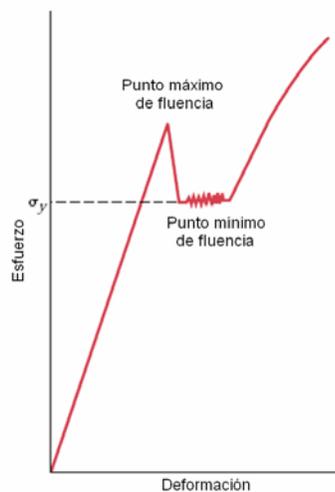


Figura 2.1.2.2. Curva de esfuerzo-deformación que muestra la fluctuación del punto mínimo de fluencia [1].

2.1.2.1 Esfuerzo a la Tracción.

Después de la fluencia, la tensión necesaria para continuar la deformación plástica en metales aumenta a un máximo, el punto M en la Figura 2.1.3, y un posterior descenso hacia la eventual fractura, punto F. La resistencia a la tracción TS es el esfuerzo máximo en la curva esfuerzo-deformación ingenieril (Figura 2.1.3). Esto se corresponde con el máximo esfuerzo que puede ser soportado por una estructura en tracción, si este esfuerzo se aplica y mantiene, dará como resultado la fractura.

Toda deformación hasta el punto de esfuerzo máximo es uniforme en toda la región de la probeta sometida a tensión. Sin embargo, en este máximo esfuerzo, una pequeña constricción o cuello comienza a formarse en algún punto, y todas las posteriores deformaciones se concentran más en este cuello, tal como indica la figura 2.1.3. [1]

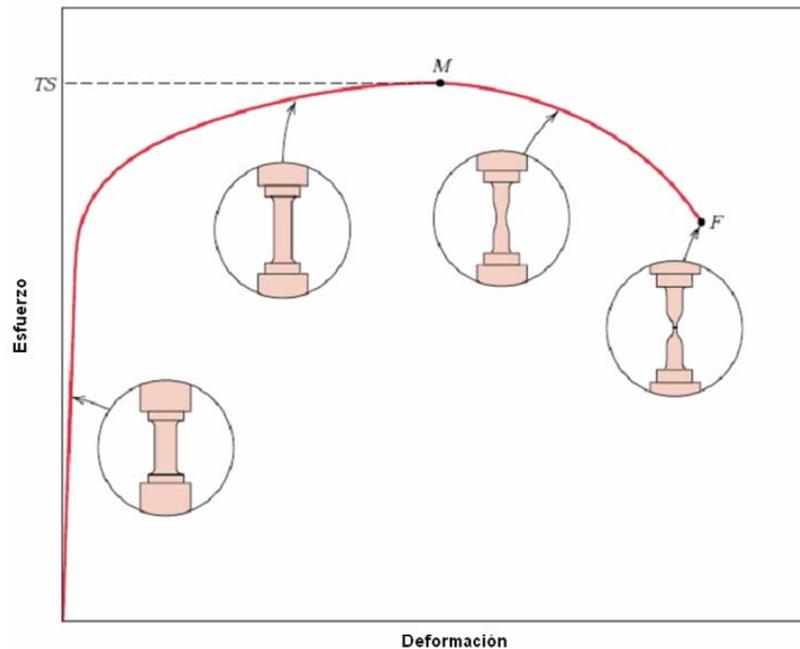


Figura 2.1.3. *Curva esfuerzo-deformación que muestra el punto que corresponde al Esfuerzo máximo y de fractura [1].*

Este fenómeno de formación de cuello provoca la fractura en esta zona de la probeta. Por lo general, cuando se requiere la resistencia de un metal para el diseño, se utiliza el esfuerzo de fluencia, debido a que en el momento en que se aplique un esfuerzo superior a este valor, el material sufrirá una deformación plástica que puede representar que el diseño pierda utilidad.

2.1.2.2 Ductilidad.

Es otra propiedad mecánica importante, se trata de una medida del grado de deformación plástica que se mantiene hasta la fractura. Un material que experimenta muy poca o ninguna deformación plástica hasta la fractura se denomina frágil. El comportamiento a tracción esfuerzo-deformación, para materiales dúctiles y frágiles es esquemáticamente ilustrado en la figura 2.1.4. [4]

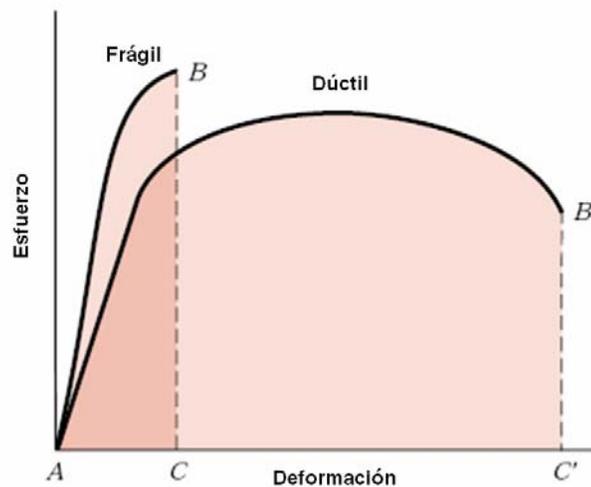


Figura 2.1.4. *Curva esfuerzo-deformación para materiales dúctiles y frágiles* [4].

La ductilidad se puede expresar cuantitativamente tanto como el porcentaje de elongación o el porcentaje de reducción de área.

El porcentaje de elongación %EL es el porcentaje de deformación plástica a la fractura,

$$\%EL = \left(\frac{l_f - l_o}{l_o} \right) \times 100$$

(Ecuación 2.2)

donde l_f es la longitud a la fractura y l_o es la longitud original de la probeta. Como una proporción significativa de la deformación plástica a la fractura se limita en la región del cuello, la magnitud de %EL depende de la longitud de la muestra. Mientras más corto sea l_o , mayor es la fracción de alargamiento del cuello en base al total y, en consecuencia, mayor es el valor de %EL. Por lo tanto, l_o debe especificarse cuando se citan valores de porcentaje de elongación [1].

El porcentaje de reducción de área es definido como,

$$\%RA = \left(\frac{A_o - A_f}{A_o} \right) \times 100$$

(Ecuación 2.3)

donde A_o es el área de sección transversal original y A_f es la sección transversal en el punto de fractura. Los valores del porcentaje de reducción en el área son independientes de l_o y A_o . Por otra parte, para un determinado material las magnitudes de %EL y %RA serán, en general, diferentes. La mayoría de los metales poseen al menos un grado moderado de ductilidad a temperatura ambiente, sin embargo, algunos se tornan frágiles a baja temperatura. [1]

El conocimiento de la ductilidad de los materiales es importante al menos por dos razones. En primer lugar, se indica cuando se requiere para el diseño el grado en que una estructura se deforma plásticamente antes de fracturarse; en segundo lugar, se especifica el grado de deformación permisible durante operaciones de fabricación.

Se considera como materiales frágiles aquellos que tienen una deformación a la fractura de menos de 5%. Así, varias propiedades mecánicas de metales pueden determinarse a través de ensayos de tracción. [1]

2.1.3 Energía asociada a la deformación mecánica.

Durante un proceso de trabajo en frío aproximadamente el 90% de la energía mecánica se convierte en calor interno producto de la interacción entre los átomos, el 10% restante de la energía mecánica utilizada es almacenada en el material como una forma de energía potencial. La mayor parte de esta energía, alrededor del 9%, es asociada con el número de dislocaciones generadas, estas dislocaciones tienen energía porque se traducen en distorsiones de la red y hacen que los átomos ocupen posiciones de mayor estado de energía; el resto de energía potencial, 1% de la energía, existe para bloquear las tensiones residuales derivadas de la deformación elástica internamente equilibrada. La energía potencial almacenada es también la principal fuerza impulsora de la recuperación y la recristalización durante un proceso de recocido. [5]

2.1.4 Recuperación elástica durante la deformación plástica.

Tras la liberación de la carga durante el transcurso de un ensayo de tracción, algunas fracciones de la deformación total se recuperan como deformación elástica. Este comportamiento se demuestra en la Figura 2.1.5, una gráfica de esfuerzo - deformación ingenieril. Durante la descarga, la curva cae en línea recta desde el punto de descarga (punto D), y su pendiente es prácticamente idéntica al módulo de elasticidad, o paralela a la zona inicial elástica. La magnitud de esta deformación elástica, que se recupera durante la descarga, corresponde a la recuperación elástica, tal y como se muestra en la Figura 2.1.5. Si se aplica de nuevo la carga, la curva va a atravesar prácticamente la misma porción lineal en la dirección opuesta a la descarga; la fluencia volverá a ocurrir al nivel de esfuerzo de descarga donde ésta fue iniciada. [1]

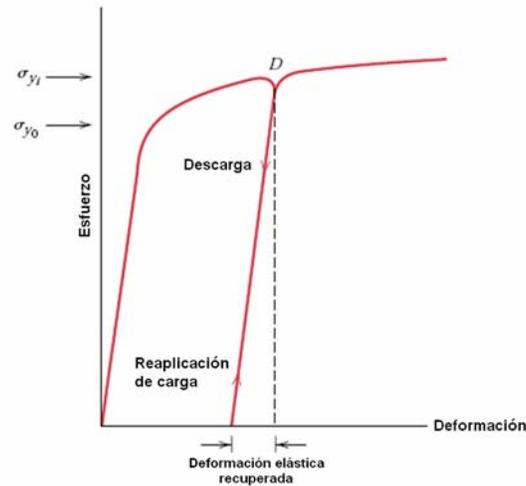


Figura 2.1.5. Curva esfuerzo-deformación que muestra la deformación elástica recuperada durante el ensayo de tracción [1].

2.1.5 Endurecimiento por Deformación.

El endurecimiento por deformación es el fenómeno mediante el cual un metal dúctil se vuelve más resistente y se endurece al ser deformado plásticamente. Es llamado también endurecimiento por trabajo en frío, debido a que la temperatura a la que se lleva a cabo la deformación es baja en relación con la temperatura absoluta de fusión del metal. La mayoría de los metales son endurecidos por deformación a temperatura ambiente. [1]

A veces es conveniente expresar el grado de deformación plástica como un porcentaje de trabajo en frío y no como deformación. El porcentaje de trabajo en frío (CW%) se define como,

$$\%CW = \left(\frac{A_o - A_d}{A_o} \right) \times 100 \quad \text{(Ecuación 2.4)}$$

donde A_0 es el área original de la sección transversal que experimenta deformación, y A_d , es el área después de la deformación. Las figuras 2.1.6.a y 2.1.6.b demuestran cómo el acero, latón y cobre aumentan el esfuerzo a la fluencia y resistencia a la tracción con el aumento de trabajo en frío. Este mejoramiento de la dureza y la fuerza se obtiene a expensas de la ductilidad del metal. Esto se muestra en la figura 2.1.6.c, en la cual la ductilidad, en porcentaje de elongación, experimenta una reducción respecto al porcentaje de trabajo en frío para las tres mismas aleaciones. [1]

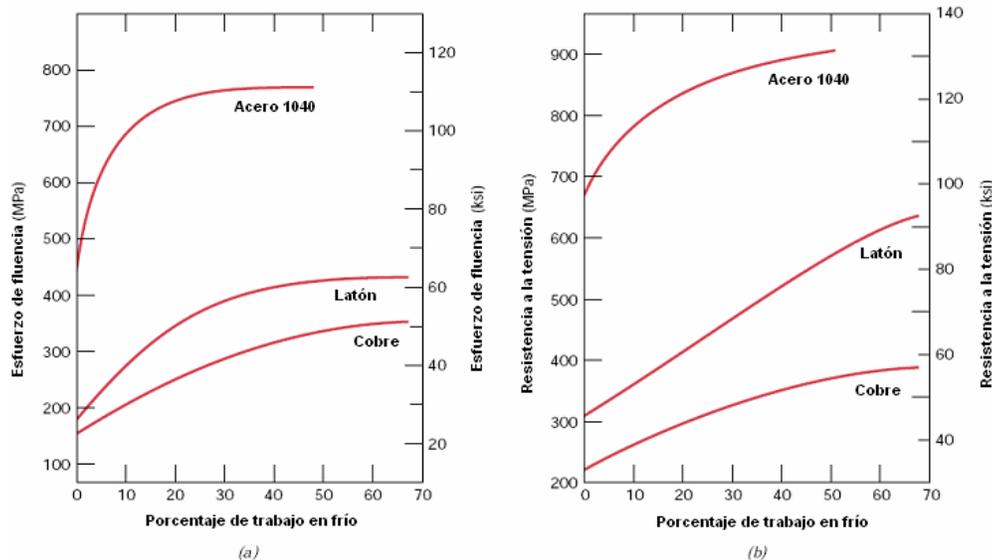


Figura 2.1.6. Para el acero 1040, latón, y cobre, (a) Aumento del esfuerzo de fluencia, (b) Aumento de la resistencia a la tracción.

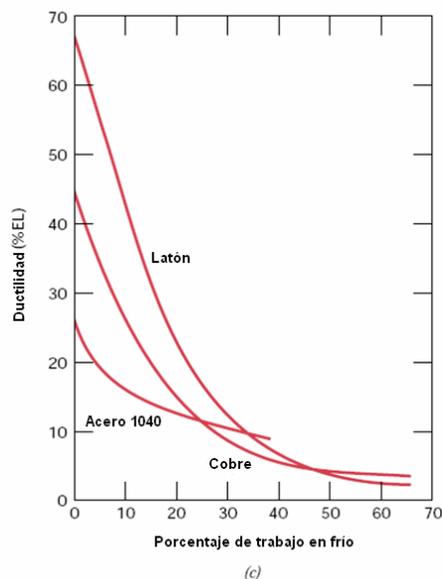


Figura 2.1.6. Para el acero 1040, latón, y cobre, (c) Disminución de la ductilidad (EL%) con varios porcentajes de trabajo en frío [6,7]

La influencia del trabajo en frío en el comportamiento de un acero sometido a tracción se muestra en la figura 2.1.6.1.

El endurecimiento por deformación es mostrado en un diagrama esfuerzo-deformación presentado anteriormente (figura 2.1.5). Inicialmente el metal con esfuerzo de fluencia σ_{y0} es deformado plásticamente hasta el punto D. El esfuerzo se libera y luego se reaplica con lo cual se obtiene un nuevo esfuerzo de fluencia σ_{yi} . El metal se ha vuelto más fuerte durante el proceso porque σ_{yi} es mayor que σ_{y0} . [1]

El fenómeno de endurecimiento por deformación se explica sobre la base de interacciones de los campos de dislocaciones. La densidad de dislocaciones en un metal aumenta con la deformación o el trabajo en frío, debido a la multiplicación o la formación de nuevas dislocaciones, en consecuencia, la distancia promedio de separación entre las dislocaciones disminuye. En promedio, los esfuerzos de interacción entre dislocaciones son repulsivos, el resultado neto es que el movimiento de una dislocación se ve obstaculizado por la presencia de otras dislocaciones. A medida que aumenta la densidad de dislocaciones, la resistencia al movimiento de éstas se vuelve mayor, por lo tanto, el esfuerzo necesario para deformar un metal aumenta con el aumento del trabajo en frío. [1]

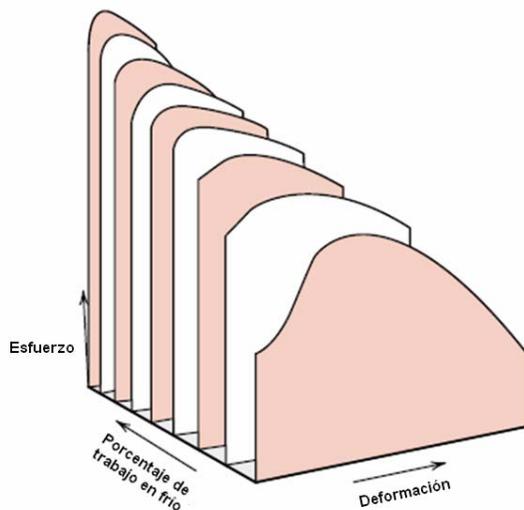


Figura 2.1.6.1. *Influencia del trabajo en frío en el comportamiento de un acero de bajo carbono sometido a tensión [1].*

El endurecimiento por deformación es a menudo utilizado comercialmente para mejorar las propiedades mecánicas de los metales durante los procedimientos de fabricación [1]. Los efectos del proceso de endurecimiento por deformación podrán ser removidos por calentamiento. En dependencia de la temperatura y el tiempo de calentamiento en el metal deformado en frío se producen diferentes cambios, en procesos de recocido [8].

2.2 DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES POLICRISTALINOS.

Para metales policristalinos, debido a las orientaciones cristalográficas aleatorias de los granos, la dirección de deslizamiento varía de un grano a otro. Para cada uno, los movimientos de dislocaciones se producen a lo largo del sistema de deslizamiento que tiene la orientación más favorable (es decir, el mayor esfuerzo de cizallamiento). Esto se ejemplifica por una fotomicrografía de una muestra de cobre policristalino que se ha deformado plásticamente (Figura 2.2.1); antes de la deformación la superficie fue pulida. Las líneas de deslizamiento son visibles, y parece que para la mayoría de los granos existen dos sistemas de deslizamiento, como lo demuestran dos series de líneas paralelas que se intersectan. Por otra parte, la variación en la orientación de los granos está indicada por la diferencia en la alineación de las líneas de deslizamiento para varios granos. [1]



Figura 2.2.1. *Líneas de deslizamiento para una especie de cobre policristalino que fue pulido y luego deformado 173x [2].*

La deformación plástica de un modelo policristalino corresponde a la distorsión comparable de los granos individuales por medio del deslizamiento. Durante la deformación, la integridad mecánica y la coherencia se mantienen a lo largo de las fronteras de grano, es decir, los límites de grano generalmente no se abren o separan. Como consecuencia de ello, cada grano se ve limitado, hasta cierto punto, en la forma que puede asumir de sus granos vecinos [5]. La forma en que se distorsionan los granos como consecuencia de la deformación plástica se indica en la figura 2.2.2. Antes de la deformación los granos son equiaxiales, o tienen aproximadamente las mismas dimensiones en todas las direcciones. Para una deformación particular, los granos se alargan en la dirección en la que la muestra fue estirada.

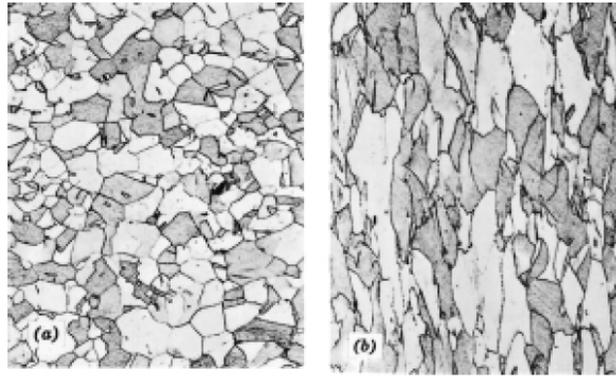


Figura 2.2.2. *Alteración de la estructura de grano de un metal policristalino como resultado de la deformación plástica. (a) Antes de la deformación los granos son equiaxiales, (b) La deformación ha producido granos alargados. 170x [2].*

Los metales policristalinos son más fuertes que los de cristal simple, lo cual significa que se necesita mas esfuerzo para lograr el deslizamiento de los planos y la consiguiente fluencia. Esto es, en gran medida, también a consecuencia de las limitaciones geométricas que se imponen en los granos durante la deformación. Aunque un solo grano puede estar favorablemente orientado con el esfuerzo aplicado para el deslizamiento, éste no podrá ser deformado hasta que los granos adyacentes menos favorablemente orientados sean capaces de deslizar también, lo que requiere un nivel de esfuerzo mayor.

2.3 CINÉTICA DE LAS REACCIONES DE ESTADO SÓLIDO.

La mayoría de las transformaciones de estado sólido no ocurren instantáneamente, éstas requieren la difusión atómica y por lo tanto se hacen dependientes del tiempo y de la temperatura; por ejemplo, ya que la mayoría de las transformaciones implican la formación de al menos una nueva etapa que tiene una composición y/o estructura cristalina diferente a la original, se requieren algunos reordenamientos atómicos a través de la difusión. La difusión es un fenómeno dependiente del tiempo, un segundo obstáculo para la formación de una nueva fase es el incremento de energía asociados con las fronteras de fase que se crean entre las fases originales y las finales.

Desde un punto de vista microestructural, el primer proceso que acompaña a la transformación de fase es la nucleación, la formación de partículas muy pequeñas (a menudo submicroscópicas), o núcleos de la nueva fase, que son capaces de crecer. Las posiciones mas favorables para la formación de estos núcleos son las imperfecciones, especialmente las fronteras de granos. La segunda etapa es el crecimiento, en la cual los núcleos incrementan su tamaño; durante este proceso, por supuesto, algún volumen de la fase original desaparece. La transformación llega a la conclusión si el crecimiento de estas nuevas partículas de fase se permite hasta que el equilibrio se alcanza.

La dependencia respecto al tiempo de la tasa de transformación (que es a menudo conocida como la cinética de una transformación) es una consideración importante en el tratamiento térmico de materiales. Con muchas investigaciones cinéticas, la fracción de la transformación que se ha producido se mide en función del tiempo, mientras que la temperatura se mantiene constante. El progreso de la transformación suele ser comprobado por cualquier examen microscópico o por la medición de algunas propiedades físicas (como la conductividad eléctrica). Los datos son representados gráficamente como la fracción de material transformado versus el logaritmo del tiempo, en una curva que se muestra en la figura 2.3, que representa el

típico comportamiento cinético de la mayoría de las reacciones en estado sólido. Las fases de nucleación y crecimiento se indican en la figura 2.3.

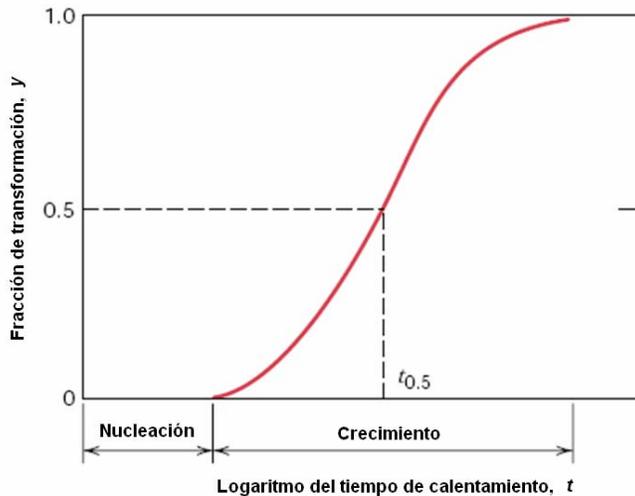


Figura 2.3. *Fracción de material transformado versus el logaritmo del tiempo, típico de muchas transformaciones de estado sólido, en las cuales se mantiene constante la temperatura [1].*

2.3.1 Tratamientos térmicos de Recocido y Recristalización.

Un metal deformado plásticamente a temperaturas que son bajas en relación con su temperatura absoluta de fusión (trabajo en frío) se encuentra en un estado de gran esfuerzo mecánico, resultante de deformaciones elásticas internamente equilibradas, esto produce cambios microestructurales y en las propiedades que incluyen (1) cambio en la forma de grano, (2) endurecimiento por deformación, y (3) un aumento de la densidad de dislocación. Estas deformaciones elásticas son debidas a las dislocaciones que se produjeron durante la deformación en frío. Una fracción de la energía utilizada en la deformación se almacena en el metal como energía de deformación, que está asociada con la resistencia en las zonas a la tracción, compresión y cortante, en torno a las nuevas dislocaciones creadas. Por otra parte, otras propiedades como la conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión pueden ser modificadas como consecuencia de la deformación plástica. [9]

Si después de trabajado en frío, el metal se calienta a una temperatura suficientemente alta entonces la energía total disponible en las regiones de alta densidad de dislocaciones hará posible el movimiento de los átomos a posiciones de equilibrio para lograr la disminución de las tensiones elásticas y la energía asociada con estos átomos será liberada. [9]

Mientras las dislocaciones se mantengan en estados de mínima energía, estas podrán ser movidas con relativa facilidad, y la resistencia a la tracción y la dureza serán reducidas a cerca de sus valores originales y la capacidad de ser trabajado en frío se habrá retomado. Esta forma de tratamiento térmico se conoce como recocido, y es necesario cuando se requiere que el material tenga cierta ductilidad pero a la vez resistencia, o bien cuando se va a someter a una deformación en frío. [9]

El término recocido se refiere a un tratamiento térmico en la que un material es expuesto a una temperatura elevada durante un largo período de tiempo y luego lentamente se enfría. Por lo general, el recocido se lleva a cabo para: (1) aliviar tensiones; (2) disminuir la dureza y aumentar la ductilidad, y/o (3) producir una microestructura específica. Una variedad de tratamientos térmicos de recocido son posibles, los cuales se caracterizan por los cambios que son inducidos, que muchas veces son a nivel microestructural y además de la alteración de las propiedades mecánicas.

Cualquier proceso de recocido consta de tres etapas: (1) calentamiento a la temperatura deseada, (2) mantener el material a dicha temperatura, y (3) enfriamiento, por lo general muy lento hasta la temperatura ambiente. Durante el calentamiento y enfriamiento, existen gradientes de temperatura entre el exterior y porciones del interior de la pieza, su magnitud dependerá del tamaño y geometría de la pieza. Si la tasa de cambio de temperatura es demasiado grande, los gradientes de temperatura y los esfuerzos internos pueden ser inducidos, dando lugar a que el material se tuerza o incluso se agriete. [1]

Por otra parte el tiempo de recocido debe ser lo suficientemente prolongado para permitir que se produzcan todas las reacciones de transformación necesarias. La temperatura es también una consideración importante; el recocido puede ser acelerado por el aumento de la temperatura, ya que normalmente se encuentran involucrados procesos de difusión.

El proceso de recocido es un tratamiento térmico que se utiliza para contrarrestar los efectos del trabajo en frío, es decir, para ablandar y aumentar la ductilidad de un metal que ha sufrido endurecimiento por deformación. Son comúnmente utilizados durante los procedimientos de fabricación que requieren una amplia deformación plástica, para permitir la continuación de la deformación sin alcanzar la fractura y sin un consumo excesivo de energía.

Por lo general si se desea una microestructura de grano fino, el tratamiento térmico se debe interrumpir antes de que se haya producido un crecimiento de grano apreciable. [1]

El recocido puede ocurrir en tres etapas separadas dependiendo de la magnitud que se requiera en el tratamiento:

2.3.1.1 Recuperación o Liberación de tensiones.

Las tensiones residuales internas pueden ser desarrolladas en piezas de metal en respuesta a: (1) procesos de deformación plástica, tales como el mecanizado; (2) enfriamiento no uniforme de una pieza que fue procesada o fabricada a una elevada temperatura, tales como la soldadura o fundición, y (3) transformación de fase que se induce en el enfriamiento donde las fases originales y producto tienen diferentes densidades [1]. Esta etapa ocurre a temperaturas relativamente bajas en la que los átomos, sin embargo, son capaces de moverse a posiciones más cerca del equilibrio en la red del cristal. Esos pequeños movimientos reducen la deformación local y, por tanto, la tensión mecánica asociada a ésta. Por otra parte, la dureza y resistencia a la

tracción se mantendrán en un valor alto, producido por el trabajo en frío, e incluso pueden aumentar. [9]

Se pueden generar distorsiones y curvaturas en el material si estas tensiones residuales no se eliminan; estos pueden ser eliminados por un tratamiento térmico de recocido para liberar tensiones, en el que la pieza se calienta a la temperatura recomendada, se mantiene el tiempo suficiente para alcanzar una temperatura uniforme y, por último, enfriado a temperatura ambiente en el aire. La temperatura de recocido es relativamente baja, lo cual no afecta los resultados derivados del trabajo en frío y otros tratamientos térmicos. [9]

Durante la recuperación, parte de la energía de deformación almacenada es aliviada debido a movimientos de dislocaciones (en ausencia de una tensión aplicada externamente), como resultado de una mayor difusión atómica a elevada temperatura. Hay cierta reducción en el número de dislocaciones, además las propiedades físicas como la conductividad eléctrica y térmica son recuperadas a su estado previo al trabajo en frío.

2.3.1.2 Recristalización.

La recristalización es uno de los procesos más importantes que controla la formación de estructuras y permite obtener la estructura sensible a las propiedades de los materiales. Esto atrae cada vez más el interés de la industria, ya que las exigencias de estas en cuanto a los requerimientos de las características mecánicas, físicas y tecnológicas de metales y aleaciones se han incrementado. [10]

Estos requisitos se cumplen de dos maneras: 1) mediante el desarrollo de nuevos procesos tecnológicos, técnicas de trabajo y tratamiento térmico de metales y 2) mediante el desarrollo de nuevas aleaciones y mejores materiales. La lista de materiales cuyo uso se asocia con los problemas de recristalización es notablemente grande. [10]

En los últimos años, se ha avanzado en la búsqueda de la esencia de la recristalización y de los procedimientos que acompañan los procesos de recuperación y específicamente de poligonización. Ya que estos fenómenos afectan la mayoría de los análisis de la estructura como resultado de la deformación de metales, el mecanismo de nucleación, y la formación de texturas, etc. [10]

Incluso después de que la recuperación es completada, los granos se encuentran todavía en un estado de energía de deformación relativamente alto. La recristalización es la formación de una nueva serie de granos, los cuales comienzan a crecer a partir de núcleos producidos en el metal deformado [9], libres de deformación y equiaxiales, éstos tienen una baja densidad de dislocación y son característicos de la condición previa al trabajo en frío. [1]

La fuerza motriz para producir esta nueva estructura de grano es la diferencia en la energía interna entre el material deformado y no deformado. La formación de nuevos granos comienza con pequeños núcleos que crecen hasta sustituir por completo el material base. Varias etapas en el proceso de recristalización están representadas en las figuras 2.3.1(a) hasta 2.3.1(d); en estas fotomicrografías, los pequeños granos son los que han recristalizado. Por lo tanto, la recristalización en metales trabajados en frío puede ser usada para mejorar la estructura de grano. [1]

Asimismo, durante la recristalización, las propiedades mecánicas que han sufrido modificaciones como resultado de trabajo en frío son devueltas a sus valores previos a éste, es decir, el metal se vuelve más dúctil y menos resistente. Algunos tratamientos térmicos están diseñados para permitir que la recristalización ocurra con estas modificaciones en las características mecánicas.

La recristalización es un proceso que depende del tiempo y la temperatura. El grado (o fracción) de recristalización aumenta con el tiempo, como puede observarse en las fotomicrografías que se muestran en las figuras 2.3.1.a-d. [1]

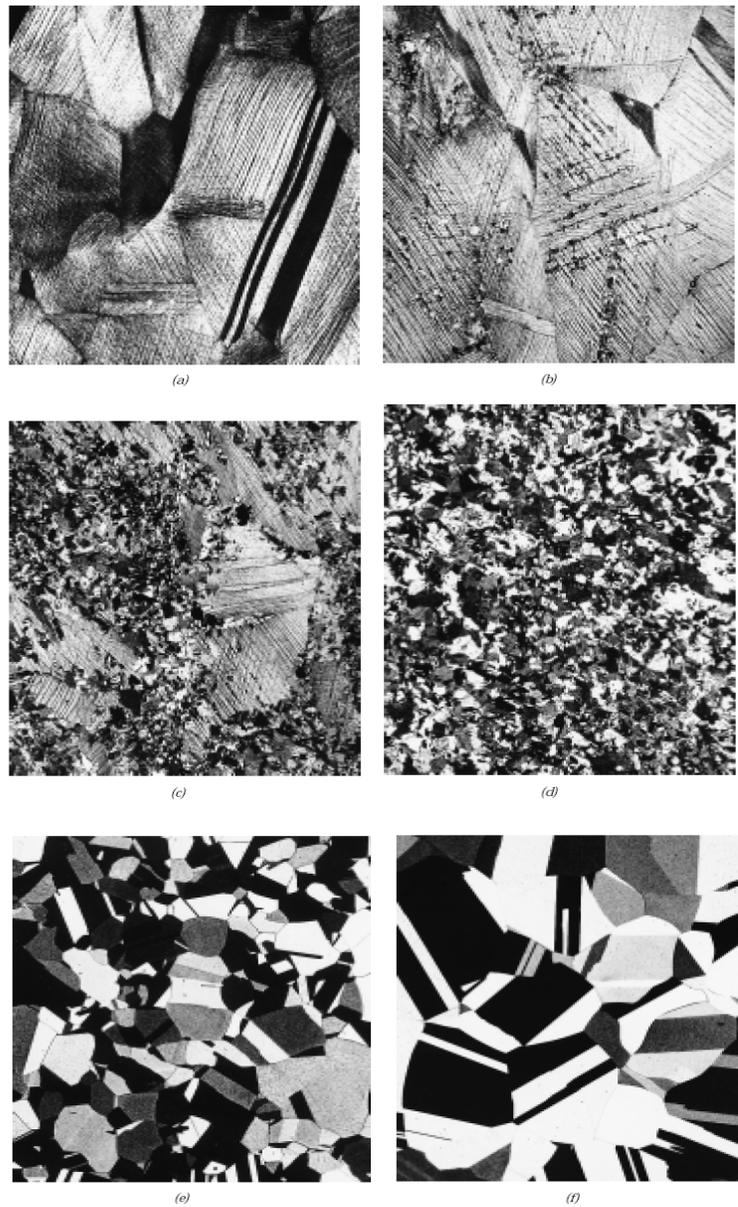


Figura 2.3.1. Fotomicrografías que muestran varias etapas de la recrystalización y el crecimiento de grano del latón. (a) trabajo en frío (33% CW). (b) etapa inicial de recrystalización tras el calentamiento durante 3s a 580 °C (1075 °F); los granos muy pequeños son los que han recrystalizado. (c) sustitución parcial de los granos producto del trabajo frío por los recrystalizados (4 s a 580 °C). (d) recrystalización completada (8s 580 °C). (e) crecimiento del grano después de 15 minutos a 580 °C. (f) crecimiento de Grano después de 10 minutos a 700 °C (1290 °F). (Fotomicrografías cortesía de J. E. Burke, General Electric Company) [1].

Los nuevos cristales son equiaxiales, es decir, que no muestran ninguna dirección de elongación. Ellos son, de hecho, de ejes iguales. Este fenómeno es empleado para producir una estructura de grano fino en los metales. Sólo en algunos casos (aceros y aluminio de bronce), es posible perfeccionar el tamaño de grano únicamente por tratamiento térmico ya que algunos cambios estructurales se llevarán a cabo en el estado sólido. [9]

La influencia de la temperatura se demuestra en la figura 2.3.2, el cual muestra la resistencia a la tracción y ductilidad (a temperatura ambiente) de una aleación de bronce en función de la temperatura, en un tratamiento térmico con un tiempo de duración de 1 h. Las estructuras de grano encontradas en las diversas etapas del proceso también se presentan esquemáticamente. [1]

El comportamiento de recristalización de una aleación de metales a veces se especifica en términos de una temperatura de recristalización, la cual es la temperatura a la que la recristalización es completada en 1 h. De este modo, la temperatura de recristalización de la aleación de bronce de la figura 2.3.2 es alrededor de 450 °C (850 °F). Normalmente, es entre un tercio y la mitad de la temperatura absoluta de fusión de un metal o aleación y depende de varios factores, incluida la cantidad de trabajo en frío realizado previamente y la pureza de la aleación. [11]

Como ha sido establecido por los primeros estudios, para los metales existe una definida correlación entre la temperatura absoluta de recristalización (T_r , K) y punto de fusión (T_m , K). También ha resultado que la temperatura de recristalización, que se determina por: T_r/T_m , puede variar sensiblemente bajo el efecto de varios factores. Entonces se establece que el reblandecimiento de un metal deformado (según sea necesario para seguir la deformación) puede obtenerse bajo una menor temperatura de calentamiento y, en general, más económicamente con una menor T_r/T_m . [10]

Aumentar el porcentaje de trabajo en frío aumenta la tasa de recristalización, con el resultado de que la temperatura de recristalización sea menor, y se acerca a una constante o valor límite para altas deformaciones; este efecto se muestra en la figura 2.3.3. [1]

Existe algún grado crítico de trabajo en frío, por debajo del cual no se puede hacer que ocurra la recristalización, tal y como se muestra en la figura 2.3.3; normalmente, esto es entre el 2 y el 20% de trabajo en frío. [1]

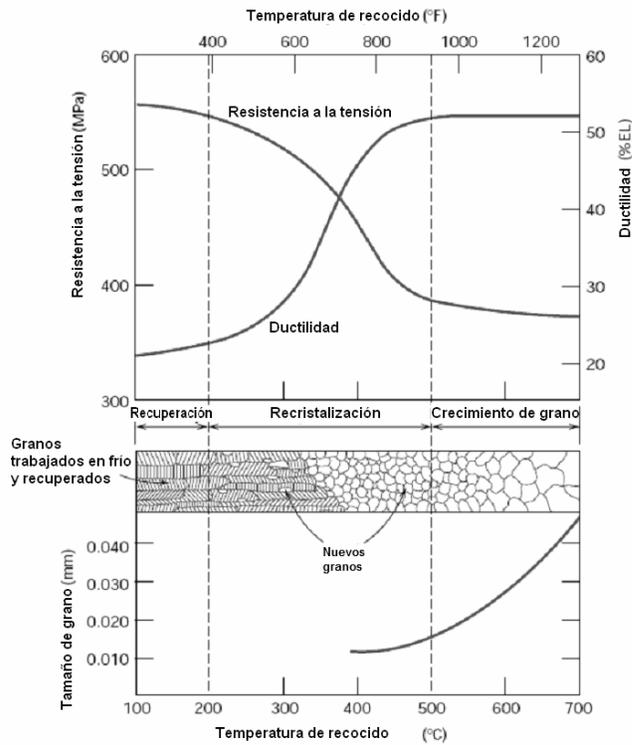


Figura 2.3.2. *La influencia de la temperatura de recocido en la resistencia a la tracción y ductilidad de una aleación de latón. Se indicó el tamaño de grano como función de la temperatura de recocido. Las estructuras de grano durante la recuperación, recristalización, y las etapas de crecimiento de grano se muestran esquemáticamente [11].*

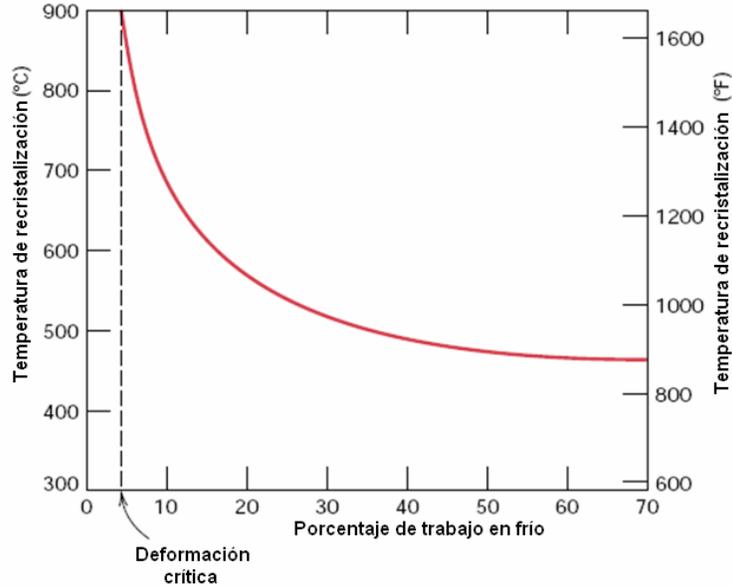


Figura 2.3.3. Variación de la temperatura de recristalización con el porcentaje de trabajo en frío del hierro. Para deformaciones menores de la crítica (alrededor de 5% CW), la recristalización no se produce [1].

La recristalización ocurre con mayor rapidez en metales puros que en aleaciones. Para metales puros, la temperatura de recristalización es normalmente $0.3T_m$, donde T_m es la temperatura de fusión absoluta; para algunas aleaciones comerciales puede llegar tan alto como $0.7T_m$. Las operaciones de deformación plástica suelen llevarse a cabo a temperaturas por encima de la temperatura de recristalización en un proceso denominado trabajo en caliente. El material se mantiene relativamente blando y dúctil, porque no se endurece durante la deformación, y por tanto se pueden alcanzar grandes deformaciones. [1]

2.3.1.3 Crecimiento de grano.

Los metales comúnmente utilizados para la manufactura de varios productos consisten en muchos cristales individuales orientados al azar (granos). Estamos, por

tanto tratando con estructuras metálicas que no son monocristales, sino que son policristales.

La nucleación, es la etapa inicial de formación de los cristales. El número de sitios diferentes en el cual se empiezan a formar los monocristales y a la velocidad a la cual crecen estos cristales influyen de forma importante el tamaño medio de los granos que se desarrollan. [5]

Los recién formados cristales continuarán creciendo, hasta que la estructura de grano sea gruesa, como se muestra en la Figura 2.3.1. [9]

Existe una energía asociada con los límites de grano, a medida que los granos aumentan de tamaño, el área total de frontera disminuye, produciendo una reducción en el total de energía, lo que es la fuerza motriz para el crecimiento del grano. El crecimiento de grano se produce por la migración de los límites de grano; obviamente, no todos los granos pueden crecer, pero los más grandes crecen a expensas de los más pequeños que disminuyen. Por lo tanto, el tamaño promedio de grano aumenta con el tiempo, y en cualquier instante existirá una amplia gama de tamaños de grano. [1]

Mientras que las fronteras del cristal tienen más altos índices de energía que la almacenada en la parte interna de los cristales, la masa policristalina reducirá su energía si algunos de los límites de grano logran desaparecer. En consecuencia, a temperaturas por encima de la de recristalización los cristales de gran tamaño logran crecer mediante la absorción de los pequeños.

El movimiento de las fronteras es sólo una difusión de corto alcance de átomos de un lado a otro de la frontera. Las direcciones de circulación de la frontera y movimiento atómico, son opuestos uno al otro, tal y como se muestra en la figura 2.3.4. [1]

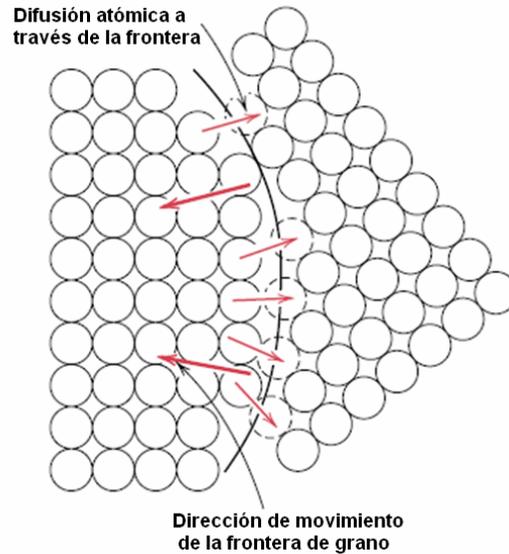


Figura 2.3.4. *Representación esquemática del crecimiento de grano a través de la difusión atómica* [3].

La frontera del cristal tiende a avanzar hacia su centro de curvatura con el fin de acortar su duración. Para facilitar esta tarea, los átomos tienden a moverse a través de la frontera a lugares de mayor estabilidad, donde son rodeados de más átomos vecinos en la cara cóncava del cristal en crecimiento. El grado de crecimiento del grano depende en gran medida de los siguientes factores:

- (a) La temperatura de recocido utilizada, a medida que aumenta la temperatura, el tamaño de grano aumenta (Figura 2.3.5).
- (b) La duración del proceso de recocido, ya que los granos crecen rápidamente al principio y luego más lentamente (Fig. 2.3.5). [9]

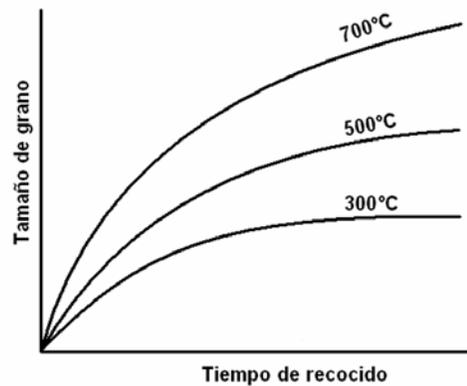


Figura 2.3.5. *Gráfica tamaño de grano-tiempo de recocido que muestra la relación de estas dos variables con la temperatura de recocido [3].*

(c) El grado de trabajo en frío realizado anteriormente. En general, las grandes deformaciones darán lugar a la formación de un gran número de regiones de alta energía dentro de los cristales. Estas darán lugar a la producción de muchos núcleos durante la recristalización y, en consecuencia, el tamaño de grano será pequeño. Por el contrario, ligeras deformaciones darán lugar a algunos núcleos y el consiguiente tamaño de grano va a ser grande (Figura 2.3.6). La cantidad crítica de trabajo en frío es aquella necesaria para iniciar la recristalización y así dar lugar a tamaños de granos muy gruesos. [9]

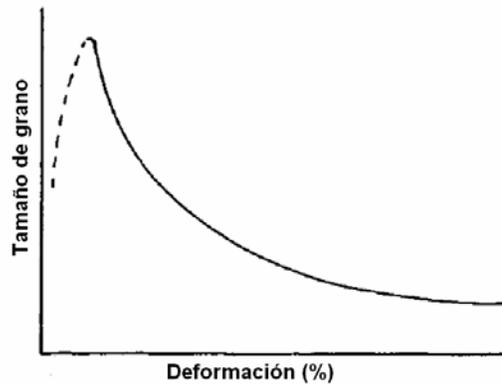


Figura 2.3.6. Curva que muestra la tendencia del crecimiento de grano respecto al porcentaje de deformación en el material [3].

(d) La utilización de determinados aditivos en un metal o aleación, como por ejemplo la presencia de níquel en los aceros de aleación limita el crecimiento de grano durante los tratamientos térmicos. El níquel es, de hecho, el refinador de grano universal y aumenta en gran medida la dureza de muchas aleaciones al limitar el crecimiento de grano. También se cree que las partículas insolubles actúan como barreras para el crecimiento de grano algunos casos, por ejemplo, al añadirse pequeñas cantidades de toria (óxido de torio) al tungsteno utilizado para los filamentos de luz eléctrica se evita el crecimiento excesivo de granos que, de lo contrario, resultaría de mantener el filamento durante largos períodos a temperaturas por encima de la recristalización del tungsteno. [9]

El tamaño de grano es generalmente determinado contando el número de cristales en un área conocida durante la microexaminación de una muestra preparada. El resultado es expresado como el número de granos por mm^2 . En los Estados Unidos el índice ASTM es usado a menudo y se obtiene contando el número de granos por in^2 vistos en una magnificación de 100X.

Para muchos materiales policristalinos, el diámetro de grano d varía con el tiempo t de acuerdo con la relación siguiente,

$$d^n - d_0^n = Kt \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

donde d_0 es el diámetro inicial de grano en $t=0$, y K y n son constantes independientes del tiempo, el valor de n es en general igual o superior a 2. La dependencia de tamaño de grano con el tiempo y la temperatura se demuestra en Figura 2.3.7, que es un esquema logarítmico de tamaño de grano en función del tiempo para una aleación de bronce a varias temperaturas. A bajas temperaturas las curvas son lineales.

Por otra parte, el crecimiento de grano se realiza más rápidamente con el aumento de la temperatura; es decir, las curvas se desplazan hacia arriba a los grandes tamaños de grano. Esto se explica por el aumento de la tasa de difusión con el aumento de la temperatura.

Las propiedades mecánicas a temperatura ambiente de un metal de grano fino son por lo general superiores (es decir, una mayor dureza y resistencia) a las de grano grueso. Si la estructura de grano de una aleación monofásica es más gruesa que lo deseado, se puede deformar plásticamente el material para obtener granos más finos, y luego someter a un tratamiento térmico recristalización, como se ha descrito anteriormente. [1]

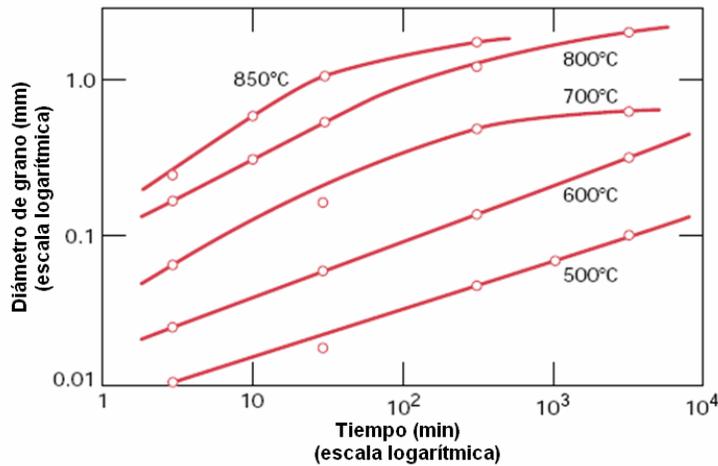


Figura 2.3.7. Logaritmo del diámetro de grano versus el logaritmo del tiempo para el crecimiento de grano del bronce a varias temperaturas [1].

2.4 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS METALES.

La influencia del tipo de enlace atómico en la conductividad eléctrica de los materiales es que en enlaces metálicos (metales) hay mayor conductividad, en tanto que los materiales con enlaces iónicos o covalentes tienen menor conductividad eléctrica. [5]

Las propiedades eléctricas en un material sólido son una consecuencia de su estructura de banda de electrones, esto es, el arreglo de las bandas de electrones más externas y la manera como éstas son ocupadas por los electrones.

Sólo los electrones con energías superiores a la energía de Fermi (energía del nivel más alto que ocupa un electrón) pueden ser acelerados en presencia de un campo eléctrico. Estos son los electrones que participan en el proceso de conducción, que se denominan electrones libres. Otra entidad electrónica cargada llamada agujero se encuentra en los semiconductores y los aislantes. Los agujeros poseen energías menores de E_f y también participan en la conducción electrónica. La conductividad eléctrica es una función directa del número de electrones libres y huecos. Además, la distinción entre conductores y no conductores (aislantes y semiconductores) se

encuentra en el número de estos electrones libres y de los agujeros de transporte de carga.

Para un electrón ser libre, debe ser promovido o excitado hacia los estados de energía superiores y vacíos. Para los metales que tienen vacantes de energía en los estados adyacentes al más alto estado lleno, muy poca energía es necesaria para promover a los electrones a los estados bajos vacíos. En general, la energía proporcionada por un campo eléctrico es suficiente para excitar un gran número de electrones hacia estos estados.

Todos los electrones de valencia tienen libertad de movimiento y forman un "gas de electrones", que es distribuido de manera uniforme en todo el entramado de núcleos de iones. A pesar de esto, los electrones no están atados a nivel local a un átomo, ellos, no obstante, deben experimentar algún grado de excitación para convertirse en electrones conductores que son verdaderamente libres. De este modo, aunque sólo una fracción de ellos es excitada, esto da lugar a un número relativamente grande de electrones libres y, en consecuencia, una alta conductividad. [1]

2.4.1 Conductividad eléctrica y propiedades mecánicas.

Algunos datos útiles pueden ser obtenidos estudiando las variaciones en las propiedades mecánicas y físicas, especialmente la resistividad eléctrica. Tales estudios hacen posible obtener algunas suposiciones o algunas veces conclusiones de la naturaleza y secuencia de los cambios estructurales. [12]

Durante el endurecimiento por deformación en frío disminuye la resistencia a la corrosión y aumenta la resistencia eléctrica. La recuperación cambia levemente las propiedades mecánicas. La resistencia en este caso, disminuye un poco, mientras que la plasticidad aumenta. Algunas propiedades físicas, por ejemplo, la resistencia eléctrica, se recuperan casi por completo [8].

La disminución en la resistividad durante la recuperación se atribuye a la reducción de la dispersión de electrones conductores en dislocaciones y vacancias [13].

Las mediciones de conductividad se han utilizado ampliamente para la caracterización de la microestructura por diversos investigadores. En las aleaciones de aluminio (2014, 2024, 6061 y 7075), con diversos tratamientos de temple se estableció la relación entre la conductividad y la dureza de diversos tratamientos de envejecimiento y se utilizó esta relación para clasificar el envejecimiento de los tratamientos [14]. Además se estableció también una correlación entre la conductividad y la resistencia mecánica para las aleaciones 7075-T6 y 2024-T3/T4 [15]. Se caracterizó el endurecimiento por precipitación de una aleación 2024 sometida a una serie de previos tratamientos térmicos de envejecimiento antes de los diversos tratamientos de temple utilizando las corrientes inducidas y las mediciones de dureza [16].

Estas correlaciones han confirmado la prometedora forma de caracterización cuantitativa de propiedades mecánicas y metalúrgicas sin recurrir a pruebas destructivas.

2.4.2 Métodos para determinar la Conductividad Eléctrica.

2.4.2.1 Método de Voltímetro-Amperímetro (método de las 4 puntas).

Este es un método rápido y sencillo para determinar la resistencia eléctrica basándose en la ley de Ohm, la cual establece que la diferencia de potencial entre dos puntos de un material es igual a la corriente que circula a través de él multiplicado por la resistencia que ofrece el material al paso de dicha corriente, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$V = I \times R \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Donde:

V = Diferencia de potencial, Voltios

I = Intensidad de corriente, Amperes

R = Resistencia, Ohms

La exactitud de este método depende de la calibración y la estabilidad de los dos medidores y del efecto de carga del voltímetro. Es conveniente emplear un voltímetro digital de alta impedancia de entrada y un amperímetro digital para reducir al mínimo el error en los valores de resistencia medidos. [17]

2.4.2.1.1 Resistividad de Volumen.

Es la resistencia eléctrica de un cuerpo por unidad de longitud, y unidad de área de sección transversal, es expresado en ohmios para un conductor teórico de unidad de longitud y área de sección transversal; en unidades métricas se expresa como $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. Se puede calcular con la siguiente expresión: [18]

$$\rho_v = (A/L) \times R \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Donde

ρ_v = Resistividad de volumen, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

A = Área de sección transversal, mm^2 .

L = Longitud, para determinar R, en m.

R = Resistencia medida, Ω .

2.4.2.2 Método de corrientes inducidas (Corrientes de Eddy).

El método de corrientes de Eddy es conocido por ser un método no destructivo (NDT) para determinar fácilmente la conductividad en diferentes materiales. La técnica de Corrientes Inducidas (también conocida como Corrientes de Foucault, Corrientes de Eddy, Corrientes Parásitas entre otros) se fundamenta en el fenómeno de inducción Electromagnética, descubierto por Michael Faraday en 1.831. Faraday demostró que al pasar una corriente eléctrica alterna, a través de una espira (alambre enrollado) ésta era capaz de producir (inducir) una corriente eléctrica en otra espira adyacente [19]. Si en lugar de las espiras adyacentes tenemos una placa de material conductor, el campo magnético variable produce una corriente en la placa que circula en lazos cerrados y se conoce como campo de corrientes de Eddy (ver figura 2.4.2.1). Las corrientes de Eddy, a su vez, crean un campo magnético en oposición al campo primario, provocando la cancelación parcial, esta disminución en el flujo magnético a través de la bobina provoca un cambio en la impedancia de la misma, las pruebas de corrientes de Eddy consisten fundamentalmente en monitorear los cambios de impedancia de la bobina. Para una interacción particular bobina-material, el valor exacto de la impedancia de la bobina depende de la geometría de la bobina, el espacio entre la bobina y el material, la conductividad eléctrica del material, la permeabilidad magnética del material y la frecuencia de excitación de la bobina. [20]

En 1.864 James C, Maxwell propuso sus famosas ecuaciones para describir el comportamiento de los campos electromagnéticos, proporcionando con esto la fundamentación teórica del método.

En 1.879, D.E Hughes desarrollo un sistema para aplicación de las Corrientes Inducidas, con el cual consiguió detectar diferencia en las medidas de Conductividad Eléctrica y Permeabilidad Magnética en función de la temperatura para diferentes materiales. En 1.926, H.E Kranz de la firma Western Electric, desarrolló un equipo para aplicación de Corrientes Inducidas, con la finalidad de medir espesores de pared para materiales que eran conductores eléctricos. En la década de 1930 fueron

desarrollados sistemas para detección de discontinuidades en línea de producción de tubería con costura, la cual es una de las aplicaciones más importantes de las Corrientes Inducidas. [19]

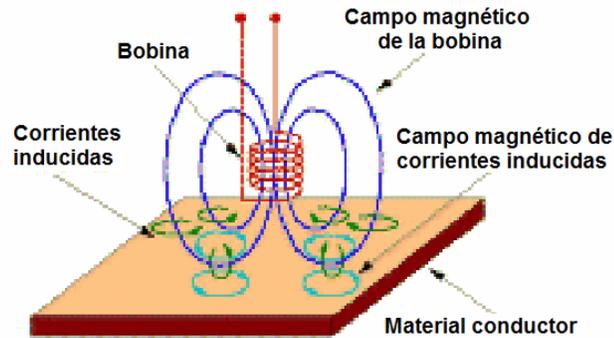


Figura 2.4.2.1 Esquema de la bobina de corrientes inducidas sobre una placa de material conductor [19].

La conductividad eléctrica, cuando es evaluada con instrumentos de corrientes inducidas, se expresa normalmente como un valor porcentual relativo a la conductividad conocida de un material. La International Annealed Copper Standard (IACS), toma como material de referencia el cobre recocido cuya conductividad es de 0.583108 S/m (100% IACS) a 20°C.

Estos ensayos son aplicables a los metales que tienen una superficie plana o ligeramente curvada e incluye metales, con o sin un fino recubrimiento no conductor. Los valores de conductividad eléctrica de una muestra pueden ser usados como un medio en la clasificación de los metales con respecto a las variables como: determinar: (1) tipo de metal o aleación, (2) el tipo de tratamiento térmico (para el aluminio esta evaluación se debe utilizar en conjunto con un examen de dureza), (3) envejecimiento de la aleación, (4) efectos de la corrosión, y (5) daños por calor.

Si la conductividad es una fuerte función de la variable de interés, estos exámenes pueden ser muy exactos. En algunos casos, sin embargo, los cambios en la

conductividad debido a los cambios en la variable pueden ser demasiado pequeños para ser detectados. La capacidad de aislar la variable de interés de otras variables también es importante. Por ejemplo, si la aleación no se conoce, el tratamiento térmico no se puede determinar solo a partir de la conductividad.

El coeficiente de temperatura α está relacionado con el porcentaje de cambio en la conductividad eléctrica por cambio de la temperatura en grados Celsius. Los cambios de α entre aleaciones de aluminio es menos del 10%, y es por ello que se utiliza por lo general el valor de $0,0039\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ [21].

Varios investigadores han usado el método de corrientes de Eddy para caracterizar microestructuras en aleaciones no ferromagnéticas y ferromagnéticas; en el caso de aleaciones no ferromagnéticas, los investigadores han establecido correlación entre las corrientes de Eddy, el parámetro microestructural y propiedades mecánicas. En aleaciones de aluminio (7020, Al-Zn-Mg), se estudió el comportamiento del envejecimiento utilizando corrientes inducidas, obteniendo correlaciones entre conductividad eléctrica y resistencia al impacto (propiedad mecánica) y se comprobó que la resistencia al impacto fue inversamente proporcional a la conductividad eléctrica [22].

2.4.2.2.1 Mediciones de conductividad eléctrica y diferenciación de materiales no magnéticos.

El circuito para el funcionamiento de los equipos de inducidas es semejante al de un detector de grietas, sus principales aplicaciones se limitan al caso de los materiales no magnéticos. Esto se debe a que los materiales ferromagnéticos presentan un efecto adicional el cual es la Permeabilidad Magnética, esta hace imposible la determinación exacta de los valores de la ya mencionada conductividad eléctrica a menos que el material sea saturado magnéticamente. [19]

En el caso de los materiales no magnéticos, los valores de permeabilidad magnética relativa son iguales a 1, como los equipos operan a frecuencias fijas, esto hace que la profundidad estándar de penetración dependa fundamentalmente de la conductividad eléctrica (σ) es decir:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \sigma \mu_r \mu_0 f}} \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Donde:

δ = Profundidad estándar de penetración (m)

σ = Conductividad eléctrica del material (S/m)

μ_r = Permeabilidad magnética relativa (adimensional)

μ_0 = Permeabilidad magnética del vacío (= $1,25 \times 10^{-6}$ Herios/m)

f = Frecuencia de la señal AC (Hz)

Esto puede observarse, analizando la definición de la Profundidad Estándar de Penetración. En general el espesor de las piezas es mayor que dicha profundidad medida en la pieza patrón, por lo tanto se puede decir que este no afecta la medición para la cual se toma como material patrón el Cobre Electrolítico al cual se le asigna arbitrariamente el valor del 100 % (Porcentaje IACS). [19]

El procedimiento aproximado para la medición sería el siguiente:

Paso 1.- Colocar la bobina (absoluta) sobre una pieza patrón y ajustar la posición del punto de operación.

Paso 2.- Colocar la bobina sobre cada uno de los materiales cuya conductividad sea conocida, registrar la posición del punto de operación. Esto proporcionara una curva patrón.

Paso 3.- Colocar la bobina sobre las piezas problema, de acuerdo a la posición del punto de operación sobre la curva de calibración, se podrá determinar por interpolación el valor de la conductividad.

Como ejemplo de esta medición, se muestra la siguiente curva de calibración.

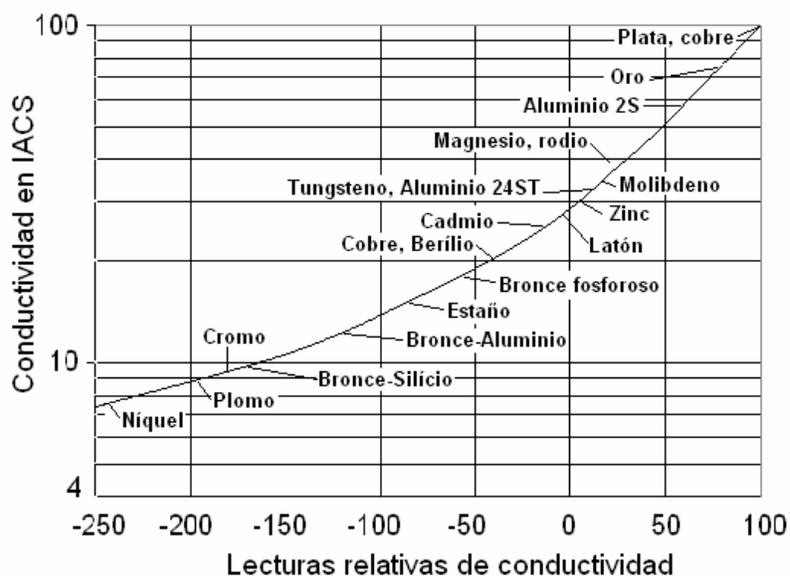


Figura 2.4.2.2. Curvas de conductividad eléctrica en porcentaje de IACS [16].

La mayoría de los metales en estado puro (sin aleaciones) pueden ser diferenciados mediante su conductividad eléctrica, pero en el caso de las aleaciones esto no se cumple de manera estricta ya que dependiendo del porcentaje de sus componentes los valores de conductividad pueden superponerse. Debemos señalar que estas medidas se pueden realizar con facilidad en el caso de los materiales no magnéticos, para los magnéticos la situación puede complicarse debido a la necesidad que se tiene de saturarlos magnéticamente.

2.4.2.3 Conductividad estratificada.

La siguiente teoría fundamenta la solución del problema directo electromagnético que consiste en determinar la conductividad estratificada.

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

$$\bar{\nabla} \cdot (\sigma \bar{\nabla} \varphi) = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

Donde σ es la conductividad eléctrica, φ el potencial eléctrico y ρ la densidad de carga. Desarrollando la ecuación en coordenadas cilíndricas, con z la dirección normal y suponiendo que σ sólo depende de la distancia a la superficie, se obtiene

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \sigma \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right) + \sigma \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

La ecuación anterior permite obtener la conductividad estratificada mediante un programa numérico donde se aplica el algoritmo inverso a la ecuación expresada en diferencias finitas [23].

2.5 ALUMINIO Y SUS ALEACIONES. PROPIEDADES.

El aluminio posee una baja densidad ($2,72 \text{ gr/cm}^3$), baja temperatura de fusión ($658 \text{ }^\circ\text{C}$) y alta conductividad eléctrica y térmica. La conductividad eléctrica del aluminio puro es de $34 \cdot 10^4 \text{ }(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$.

El aluminio puro es resistente a la corrosión, lo que se explica por la formación en su superficie de una película compacta de óxido de aluminio (Al_2O_3). Cuanto más puro es el aluminio, más alta es su resistencia a la corrosión y mayor su conductividad eléctrica [8].

El aluminio en calidad de material de construcción se emplea en forma limitada por su baja solidez. Las propiedades mecánicas más altas las tienen las aleaciones de aluminio, las cuales se emplean ampliamente en la industria.

Los elementos aleantes Cu, Mg, Zn y Si, en distintas combinaciones con el aluminio, muestran un rango de solubilidad en estado sólido que hace posible aplicarles a dichas aleaciones tratamientos térmicos que le concedan resistencia y dureza.

Los factores de importancia en la selección de aluminio y de sus aleaciones son su elevada relación resistencia a peso, su resistencia a la corrosión frente a muchos productos químicos, su elevada conductividad térmica y eléctrica, y su facilidad de conformado y de maquinabilidad. [5]

En términos de tonelaje, una de las aleaciones termotratables más importante es la Al-Mg-Si, cuya resistencia oscila entre una tensión de rotura de $15,3$ a $30,6 \text{ Kgf/mm}^2$ y un punto de fluencia ($0,2\%$) entre $10,2$ y $27,5 \text{ Kgf/mm}^2$. Se alcanzan tensiones de fluencia de hasta 51 Kgf/mm^2 y una elevada relación de Tensión de fluencia/Tensión de rotura. [5]

Las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6063 pueden ser mejoradas a través de los tratamientos térmicos de solubilización, enfriamiento y envejecimiento. La resistencia de la aleación se basa en el sistema Al-Mg-Si y es

dependiente de la cantidad de Mg y Si en la solución sólida y el tamaño y distribución de las partículas de Mg_2Si precipitadas [24].

En las aleaciones Al-Mg-Si, el endurecimiento obtenido después del templeado y revenido se debe a la dispersión del Mg_2Si en la matriz α , mientras que la propia α se endurece por el exceso de silicio o de magnesio comparado con la relación estequiométrica de Mg_2Si . [5]

Una característica del grupo es el temple estable, que se produce por un tratamiento térmico de solución, que consiste en calentar la aleación a una temperatura debajo del punto de fusión, a la cual el constituyente de aleación pasa a una solución sólida, seguido por enfriamiento por inmersión para retener esta condición. Las piezas fabricadas podrán recibir un tratamiento de envejecimiento o curado a baja temperatura, para desarrollar el temple. Durante el calentamiento los componentes disueltos se precipitan en partículas muy finas. [25]

2.5.1 Designación de las aleaciones de aluminio en bruto.

Las aleaciones de aluminio en bruto se identifican mediante cuatro dígitos y una designación de temple mostrando el estado del material. Se identifica el elemento principal de las aleaciones mediante el primer dígito. [5]

La aleación 6063 pertenece a la serie 6xxx- Magnesio y silicio- resistencia media; buena formabilidad, maquinabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión; tratable térmicamente. [5]

2.6 TRATAMIENTO TÉRMICO DE ALEACIONES DE ALUMINIO.

Las aleaciones de aluminio que son tratables térmicamente, se endurecen y aumentan su resistencia mediante un proceso conocido como endurecimiento por precipitación. Este tratamiento térmico es una técnica en donde pequeñas partículas (de una fase diferente y conocidos como precipitados) se dispersan de una manera uniforme en la matriz de la fase original. En este proceso, se forman precipitados porque queda excedida la solubilidad sólida de un elemento (uno de los componentes de aleación) en el otro. [5]

2.6.1 Tratamiento térmico de solubilización.

Si se calienta la muestra de material por encima de la curva solvus (figura 2.6.1) [26] se obtiene una microestructura monofásica. Si se enfría el sistema a velocidad suficientemente rápida hasta la temperatura ambiente (temple), se congela la microestructura existente. El objetivo del temple de precipitación es la formación de una solución sólida sobresaturada en equilibrio inestable. El calentamiento se realiza a unos 520°C hasta lograr la máxima solubilización de los componentes, y luego el enfriamiento se lleva a cabo de manera brusca en agua a temperatura ambiente. Una temperatura deficiente en el tratamiento de solubilización, implica la falta de homogeneización, lo cual se traduce en la imposibilidad de conseguir elevadas propiedades mecánicas en el posterior envejecimiento. Por otra parte una temperatura excesiva origina fusión incipiente en los límites de grano: la aleación se quema. La aleación quemada reduce considerablemente la ductilidad. [27]

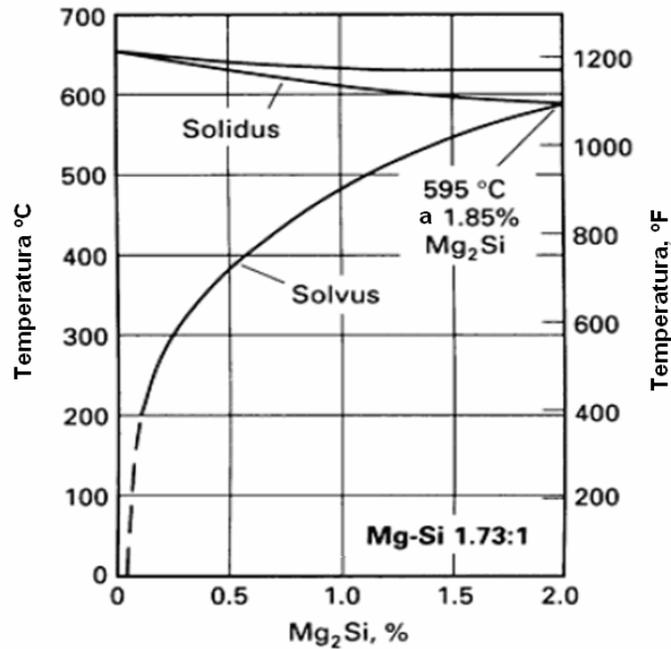


Figura 2.6.1. Diagrama de fase para la aleación Al-Mg-Si [26].

2.6.2 Fundamentos del tratamiento térmico de envejecimiento.

El envejecimiento es un procedimiento de endurecimiento que consiste en provocar la aparición de un precipitado finamente dividido de una segunda fase en el seno de una matriz monofásica (disolución sólida sobresaturada) por un tratamiento térmico, el cual consiste en calentar el sistema a temperatura suficiente para facilitar la difusión, pero sin llegar al campo monofásico. La microestructura monofásica se convierte en bifásica por un tratamiento térmico de difusión.

La temperatura del tratamiento térmico puede ser la del ambiente (envejecimiento natural) o superior (envejecimiento artificial). La finalidad de este tratamiento no es otro que dar posibilidad al sistema para que se cumpla el diagrama de equilibrio a nivel microscópico: que la segunda fase aparezca finamente distribuida.

Manteniendo el sistema demasiado tiempo a cierta temperatura o permaneciendo a temperatura demasiado elevada, llega a una disminución de la dureza: es el sobre-envejecimiento.

Durante el envejecimiento ocurre la aparición de precipitados de la segunda fase que aparece en la red coherente. Se define como red coherente, cuando los átomos B de la segunda fase se colocan agrupados pero dentro siguiendo la misma estructura cristalina que la red de la fase A. Como normalmente los átomos B serán de distinto tamaño que los átomos A, se distorsionará la red. Este núcleo de red distorsionada es la que dificulta el paso de dislocaciones. Es decir, se aumenta el límite elástico y la dislocación se dobla en forma de anillos expansores alrededor de las partículas de precipitado, lo que aumenta la resistencia. La dificultad de desplazarse las disoluciones es tanto más eficaz cuanto mayor es el número de precipitados.

Como la nucleación de los precipitados en forma heterogénea es más fácil que la homogénea, tendrá mayor importancia. La heterogénea se origina en los límites de grano o en los planos de deslizamiento. Esto representa un retraso entre la respuesta al envejecimiento en áreas que experimentan nucleación heterogénea y las de nucleación homogénea.

Una precipitación rápida produce un efecto característico. El efecto es que las partículas de precipitado pueden crecer en tamaño y agota el soluto de las áreas cercanas a los límites.

Las partículas de precipitado no son siempre de la forma esférica, sino que pueden ser acicular o en forma de placas o agujas. Se alinean a lo largo de planos cristalográficos específicos o direcciones de cristales de matriz. [27]

2.7 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN MICROSCÓPICA DE LA ESTRUCTURA DE LOS METALES Y ALEACIONES.

El microanálisis se emplea para el estudio de la microestructura. El microanálisis es uno de los métodos fundamentales de investigación de la estructura de los metales.

Esto se explica por el hecho de que entre la microestructura del metal y muchas de sus propiedades hay una dependencia cualitativa directa.

El microanálisis permite determinar el tamaño y la forma de los granos, la disposición de las fases, los componentes de la aleación y revelar la estructura característica para algunos tipos de tratamiento.

Para efectuar el microanálisis del metal a investigar se prepara una probeta, la cual se rectifica, se pule y se somete a un ataque químico con un reactivo especial.

Bajo la acción del reactivo se produce una disolución selectiva de las fases metálicas, como así mismo de sus zonas límites a causa de la diferencia que existe en las propiedades físico-químicas. Como efecto de esto se forma un relieve, que al ser observado al microscopio, las zonas que se disolvieron más efectivamente aparecen más oscuras por su menor coeficiente de reflexión (debido a la superficie decapada), y las que no se disolvieron, más claras. Puesto a que los límites de grano son decapados con más intensidad que los propios granos, en los lugares correspondientes a los límites se obtienen cavidades. Como consecuencia de la difusión de la luz en las zonas de las cavidades, los límites de granos parecen oscuros. En algunos casos, diferentes granos de un mismo metal se decapan de diferentes maneras [8].

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Para lograr los objetivos planteados en el presente estudio, se procedió a llevar a cabo una serie de procedimientos en distintas etapas, los cuales fueron ejecutados como parte de las actividades prácticas que se establecen en el marco experimental para el desarrollo del trabajo de investigación.

3.1 PROBETAS.

El material utilizado para las probetas fue aluminio 6063T6, el cual es una aleación Al-Si-Mg bajo un tratamiento denominado T6 que implica que el material fue extruido, solubilizado, templado y envejecido. La composición química del material se muestra en la Tabla 3.1.1. Para lograr que el material aumentara su ductilidad y permitiera mayores deformaciones durante el ensayo de tracción, el mismo fue sometido a un tratamiento de solubilización a una temperatura de 520°C durante 1h, y luego enfriado rápidamente en agua a temperatura ambiente para mantener la microestructura lograda con el calentamiento.

Tabla 3.1.1. *Composición Química del Aluminio 6063 según la ASM Internacional.*

Composición Química del Aluminio 6063 (% peso)									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros
0,2-0,6	0,35	0,1	0,1	0,45-0,9	0,1	0	0,1	0,05	0,15

Para realizar los ensayos de tracción y obtener las curvas características de Esfuerzo-Deformación se maquinaron las probetas [28] como se muestra en la figura 3.1.1. Las curvas del ensayo de tracción correspondientes a cada probeta permitieron obtener la información para determinar la carga a la cual se obtuvieron los porcentajes de deformación requeridos para los estudios de conductividad posteriores.



Figura 3.1.1 *Probetas para los ensayos de tracción.*

Tanto las probetas para los ensayos de tracción, las probetas que fueron deformadas en distintos porcentajes (figura 3.1.2), y las que se obtienen de éstas después de deformadas para los tratamientos térmicos, se maquinaron en el Taller de Máquinas Herramientas de Post-grado del **Edificio de Física de la FIU-CV** y en el Taller de Máquinas Herramientas de la **EIM-UCV** (figura 3.1.3).



Figura 3.1.2 *Probetas para deformación a porcentaje específico*



Figura 3.1.3 *Maquinado de probeta para deformación.*

Las probetas maquinadas para los tratamientos térmicos y mediciones de conductividad se muestran en la figura 3.1.4.



Figura 3.1.4 *Probetas maquinadas para los tratamientos térmicos y mediciones de conductividad.*

3.2 ENSAYO DE TRACCIÓN.

Los ensayos de tracción se realizaron en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la **EIM-UCV**, en la máquina de ensayos universales marca Losenhausen, modelo Steverpult Z. UHP 20, serial 22831 y que maneja una carga máxima de 20 Mp (figura 3.2.1) y en la máquina de tracción del **IMME-UCV** marca A.H. Emery Co. modelo Baldwin Tate Emery Testing Machine con capacidad máxima de 30.000 kgf (figura 3.2.2). El propósito de obtener la curva esfuerzo-deformación ingenieril del material después de ser solubilizado, fue el de determinar la carga a la cual se debieron someter las probetas para obtener distintos porcentajes de deformación (Ecuación 2.2), sin que éstas alcanzaran el esfuerzo máximo, ya que al superar este punto se puede producir daño en el material y además la deformación deja de ser uniforme.

Se calculó la carga máxima a ser aplicada a las probetas a partir del esfuerzo máximo de las probetas ensayadas a tracción y la menor área de sección transversal de las probetas a deformar en tres (3) porcentajes distintos. Se aplicaron valores de carga por debajo de la máxima.



Figura 3.2.1 *Máquina de ensayos universales de la EIM-UCV*



Figura 3.2.2 *Máquina de ensayos del IMME*



Figura 3.2.3. *Probeta N°3 sometida a tracción para una deformación de 7,8%.*



Figura 3.2.4. *Reloj de la máquina de tracción del **IMME** que muestra la carga de 7000 Kg aplicada a la probeta N° 3.*

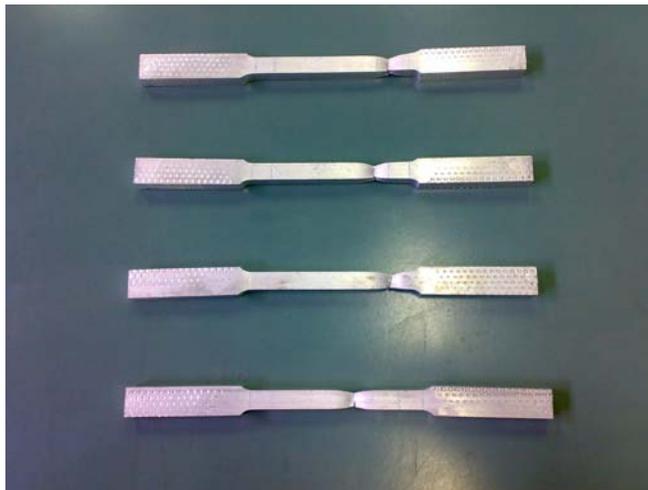


Figura 3.2.5. *Probetas sometidas a un ensayo de tracción para obtener la curva esfuerzo-deformación del material.*

3.3 MEDICIONES DE CONDUCTIVIDAD.

3.3.1 Medición de conductividad eléctrica por el método de las cuatro (4) puntas.

3.3.1.1 Procedimiento.

Se realizaron las mediciones de las dimensiones de todas las muestras de prueba. El ancho y largo se midieron con un vernier marca Somet de apreciación de 0,02mm y los espesores fueron medidos con un tornillo micrométrico marca Mitutoyo, modelo N° 293-369, de apreciación 0,001mm. Las longitudes entre los posibles contactos se garantizó mediante la utilización de cuchillas y dichas longitudes fueron medidas con el vernier anteriormente mencionado. Las mediciones de voltaje y corriente se realizaron con dos (2) multímetros marca Hewlett Packard, modelos 34401A, a una temperatura de 20°C, y el tiempo para registrar los valores debió ser corto (menos de 5 segundos) para evitar cambios en las variables medidas (corriente y voltaje) debido al calentamiento de los equipos y probetas. Se cuidó de que la superficie estuviese limpia para garantizar el contacto eléctrico con las cuchillas.

El montaje experimental constaba de un generador de corriente marca BK-PRECISION, modelo 1660 que se fijó en un valor de 2 Ampere, y dicha corriente se hacia circular a través de las probetas; utilizando uno de los multímetros se registró la diferencia de potencial entre las cuchillas y con el otro los valores de corriente. Estas mediciones se repitieron de 12 a 14 veces para cada probeta, con las cuales se obtuvo un promedio de la resistencia eléctrica en cada una de las probetas deformadas.

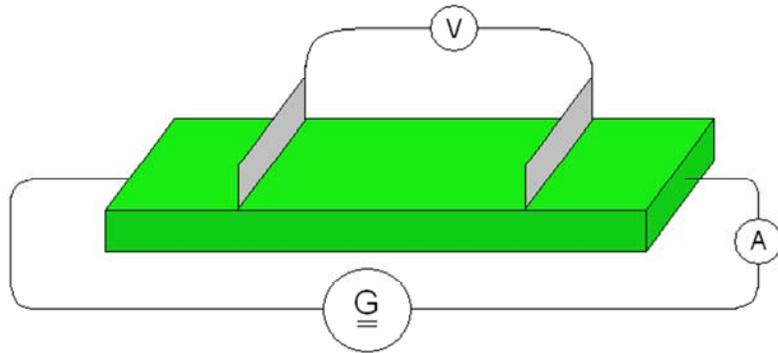


Figura 3.3.1. (a). *Esquema general del método de las 4 puntas.*

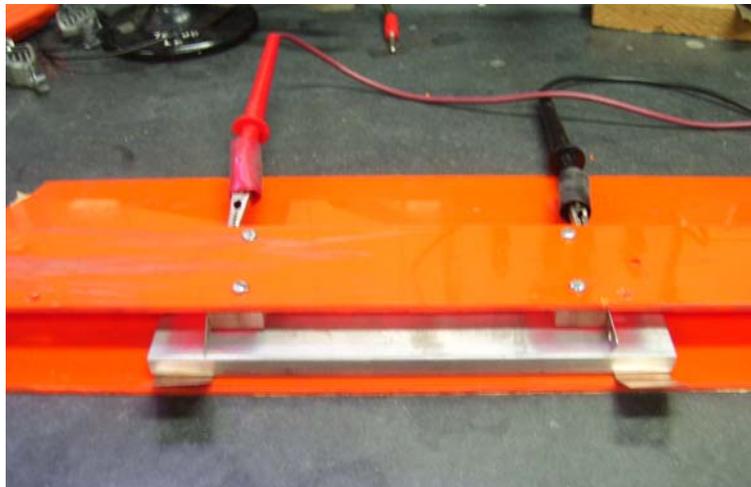


Figura 3.3.1. (b). *Probeta sobre dos láminas de bronce las cuales garantizan una distribución homogénea de la corriente a través de la misma. Sobre esta se encuentran las cuchillas entre las cuales se mide la diferencia de potencial.*

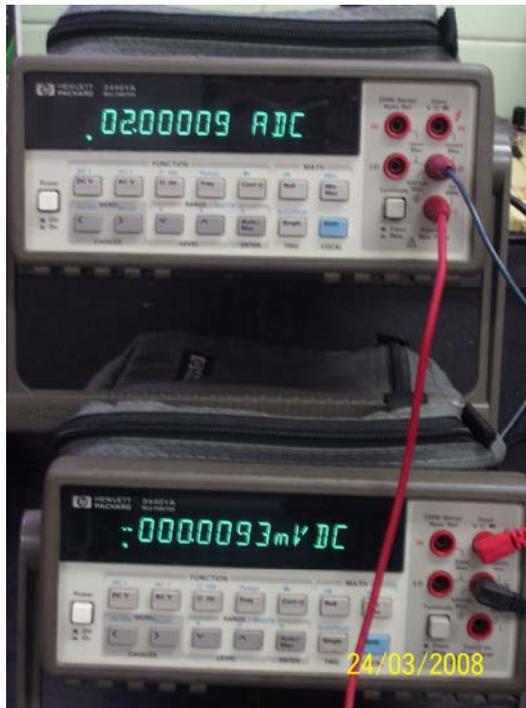


Figura 3.3.2. *Multímetros para la medición de corriente (superior) y diferencia de potencial (inferior).*

La resistencia en el material se obtuvo mediante la Ley de Ohm (**Ecuación 2.6**):

$$V = I \times R$$

Y los valores de resistividad fueron obtenidos mediante la **Ecuación 2.7** siguiente:

$$\rho_v = (A/L) \times R$$

La resistividad obtenida es el inverso de la conductividad en la dirección en la cual circula la corriente eléctrica, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\sigma = 1/\rho_v \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

3.3.2 Mediciones de Conductividad mediante el método de corrientes inducidas (Corrientes de Eddy).

3.3.2.1 Variables tomadas en cuenta para garantizar una evaluación precisa de la conductividad eléctrica

- Temperatura: Se estabilizó el equipo y sus partes, además de las probetas a la temperatura ambiente (20 °C) antes de iniciar la evaluación de la conductividad. Esto se realizó porque según la ASTM-E1004 [21] es recomendable en la medida de lo posible, que se lleven a cabo las mediciones de conductividad a temperatura ambiente.
- Acoplamiento del metal a la sonda de la bobina: Se consideró para la medición que el acoplamiento de la bobina al material fuese en un tiempo muy corto para evitar el calentamiento de la pieza y además la bobina se colocaba directamente sobre las probetas para evitar una medición errónea por causa del despegue. Estos ajustes se tomaron en cuenta porque la norma ASTM-E1004 indica que existen variaciones en la separación entre la sonda de la bobina y la superficie de la muestra (lift-off), lo cual causa cambios en la señal de salida del instrumento.
- Efecto de borde: Se cuidó que las pruebas no se realizaran a distancias por debajo de dos diámetros de bobina de cualquier discontinuidad como un borde, esto lo recomienda la norma ASTM-E1004.
- Homogeneidad de la muestra: Para las mediciones de la conductividad se examinaron las muestras, para cuidar de no colocar la bobina cerca de defectos en la superficie como rayones o grietas.

- Condiciones de la superficie: Las superficies de las muestras debieron estar libres de grasa y/o del refrigerante utilizado en el proceso de maquinado. Para ello se lavaron con agua y jabón líquido.

- Estabilidad del instrumento: Se consideró que algunas condiciones externas como el ruido, y vibraciones pueden causar errores en la medición, ya que provocan interferencia en el funcionamiento del equipo.

- Espesor de la muestra: Según la norma ASTM E-1004 la densidad de la corriente de Eddy disminuye exponencialmente con la profundidad (es decir, la distancia desde la superficie del metal). La profundidad a la que la densidad de la corriente es de aproximadamente el 37% ($1/e$) de su valor en la superficie se llama el nivel estándar de profundidad de penetración δ . Se tomó una frecuencia de 50 kHz (recomendada para el tipo de palpador utilizado), y para ésta resultó una profundidad estándar δ igual a 0,4mm. Para valores muy por debajo de 50 kHz el equipo pierde precisión porque se vuelve más sensible a la relación señal-ruido electromagnético. Por el contrario para valores de frecuencias muy por encima de 50 kHz la profundidad de penetración de la densidad de corriente se hace muy pequeña y el equipo se hace más sensible a las discontinuidades del material mientras pierde sensibilidad a los cambios de propiedades eléctricas.

- Manipulación de la bobina en las mediciones: La bobina utilizada tenía un recubrimiento de material aislante para que al ser manipulada se redujeran al mínimo los efectos de la transferencia de calor de la mano a la bobina. Además considerando las recomendaciones de la ASTM-E1004 se cuidó que la longitud del cable de conexión entre la bobina y el equipo fuese la que especifica el manual del equipo.

- Coefficiente de temperatura: Para las mediciones absolutas de la conductividad eléctrica, el coeficiente de temperatura era conocido y utilizado para que el error sistemático debido a la temperatura fuese insignificante.

3.3.2.2 Estandarización y calibración.

El equipo de corrientes inducidas fue calibrado respecto a las divisiones mediante la temperatura y el valor de voltaje correspondiente a la misma. Mediante un montaje experimental en el cual se hizo uso de una termocupla tipo T (cobre-constantan) que tiene tres (3) extremos, dos (2) de los extremos combinan un alambre de cobre y otro de constantan, y el otro extremo dos alambres de cobre.

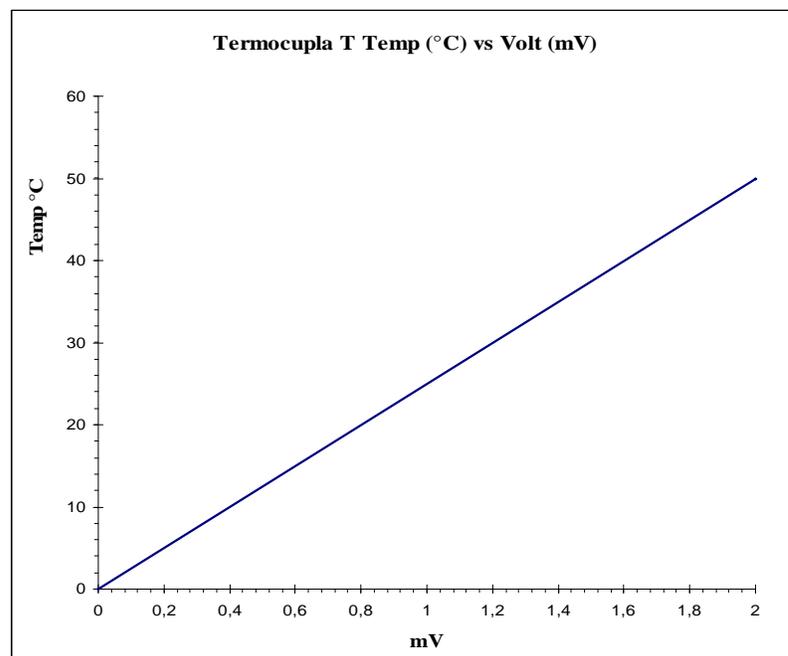


Figura 3.3.3. *Gráfica diferencia de Temperatura- voltaje de la termocupla T (cobre-constantan)*

Uno de los extremos de la termocupla que combina los dos materiales (cobre-constantan) se introdujo en una muestra del material que se mantuvo a temperatura ambiente y el otro extremo en la condición anterior fue introducido en la otra pieza

del material original que fue calentada aumentando su temperatura progresivamente en el orden de 1°C; el extremo de la termocupla que tiene dos terminales de cobre se conectó al equipo para medir la diferencia de potencial que corresponde a la diferencia de temperatura entre las dos muestras de material. Dicha correspondencia entre temperatura y diferencia de potencial se obtuvo mediante la curva de operación de la termocupla (figura 3.3.3). La temperatura se aumentó progresivamente hasta 9°C por encima de la temperatura ambiente para registrar el número de divisiones correspondientes por grado centígrado, en el equipo de corrientes inducidas.

En el siguiente gráfico (figura 3.3.4) se muestra la tendencia de los datos registrados para la calibración, y de la recta se obtuvo el valor de la pendiente por el método de los mínimos cuadrados (0,8567 temperatura/número de divisiones), la cual al multiplicarse por el número de divisiones registradas en el equipo de corrientes inducidas se obtuvo el valor de temperatura por encima de la temperatura ambiente que corresponde a dicha medición.

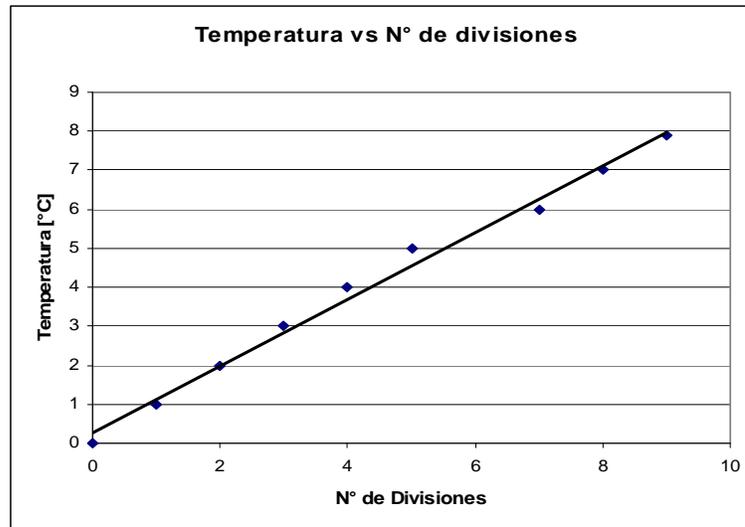


Figura 3.3.4. Gráfico que resultó de la calibración del Equipo de corrientes inducidas.

3.3.2.3 Procedimiento.

El equipo de corrientes inducidas (figura 3.3.5) era encendido con un tiempo suficiente de antelación (aproximadamente 1 hora) a las mediciones para permitir que se estabilice, de conformidad con las instrucciones del fabricante.

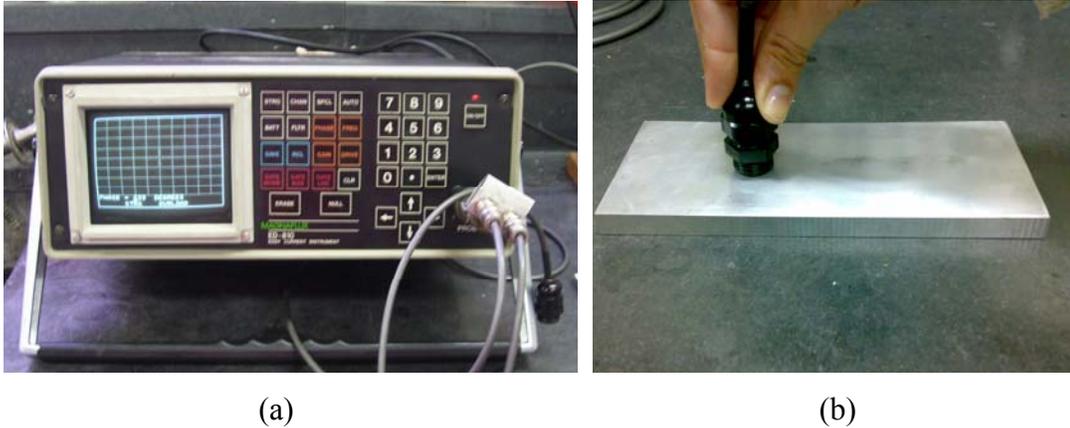


Figura 3.3.5 (a). *Equipo de corrientes inducidas.* (b). *Bobina del equipo de corrientes inducidas sobre una probeta de aluminio.*

Se tubo cuidado durante el tiempo de mediciones que la temperatura del instrumento y las probetas se mantuvieran dentro de los ± 1 °C de la temperatura ambiente, como una manera de reducir los errores debido a la temperatura.

La estandarización se llevó a cabo al inicio del proceso de medición y por lo menos una vez cada hora de funcionamiento continuo o cuando se sospechó un inadecuado funcionamiento del sistema. Los parámetros que se establecieron en el equipo son una fase de 233° para fijar la curva de lift-off en una posición vertical, una ganancia de 40dB que permitió visualizar con mayor precisión los cambios en la conductividad, una frecuencia de 50 kHz, y una ganancia por eje de $X=5$ y $Y=1$, que al igual que la ganancia de 40dB contribuye a una lectura más precisa en el eje donde se refleja el cambio de la conductividad.

Se consideró en cada medición que al bajar 6dB se reduce el factor de sensibilidad a la mitad, lo cual implica que la distancia en realidad era el doble de la que mostraba la pantalla del equipo, y por el contrario al subir 6dB se aumenta el factor de sensibilidad y ocurría lo contrario. La relación entre la ganancia y la amplitud se muestra en la ecuación 3.2, donde A_2/A_1 es la relación entre la amplitud que se desea respecto a la cual se calibró el instrumento. Dichas consideraciones resultaron necesarias cuando la curva de lift-off se salía de la pantalla o cuando su distancia respecto a la curva de referencia (cero divisiones) era muy pequeña (menor de $\frac{1}{2}$ de división de pantalla).

$$\text{dB} = 20 \log (A_2/A_1) \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Se colocaba la bobina sobre la muestra, y se procedía a leer los resultados en la pantalla en forma de divisiones (figura 3.3.6). Se tomó como material de referencia una muestra del metal original (aluminio 6063T6) cuya conductividad era conocida por el método de las 4 puntas (método convencional), y para efectos de determinar la conductividad por corrientes de Eddy este material representaba cero divisiones.

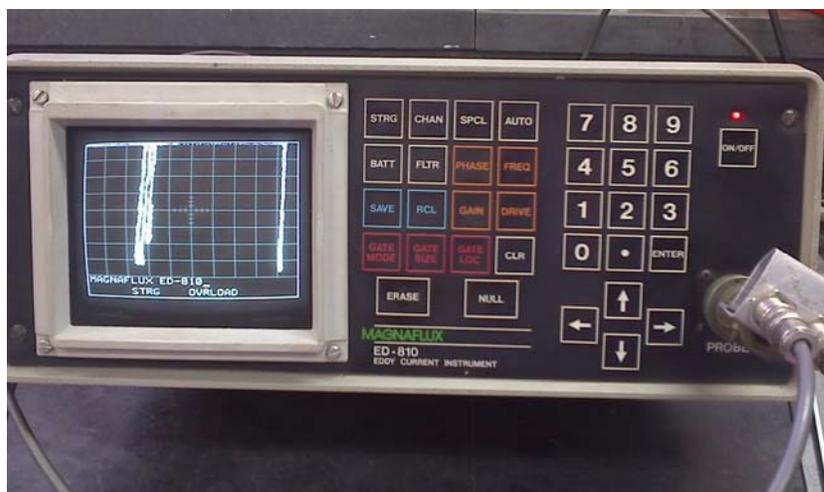


Figura 3.3.6. Medición de la probeta 6063 sin T6 respecto a la referencia 6063T6. Se observan las curvas de lift-off para los materiales.

Los valores de resistividad son obtenidos mediante la ecuación siguiente:

$$\rho_t = \rho_T \times (1 + \alpha_T (t - T)) \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Donde:

ρ_t = Resistividad a la temperatura t a la cual corresponde el número de divisiones

ρ_T = Resistividad a la temperatura T de referencia

α_T = Coeficiente de temperatura T

t = Temperatura a la cual corresponde el número de divisiones

T = Temperatura de referencia

3.3.3 Mediciones de conductividad estratificada.

3.3.3.1 Procedimiento.

Para la medición de la conductividad estratificada se realizó el montaje de la figura 3.3.7; este constaba de dos electrodos afilados contrapuestos en ambas caras de la probeta a través de los cuales se hacía circular una corriente de 1 Amperes, y un tercer electrodo en una de las caras con el que se fue tomando valores de diferencia de potencial a medida que se alejaba el mismo de la línea por la cual circulaba la corriente (ver figura 3.3.8). Para separar este electrodo se utilizaron láminas de material aislante con un espesor de 0,1mm, la diferencia de potencial se midió para intervalos de separación de 0,1 mm hasta llegar a 1 mm (Figura 3.3.9).

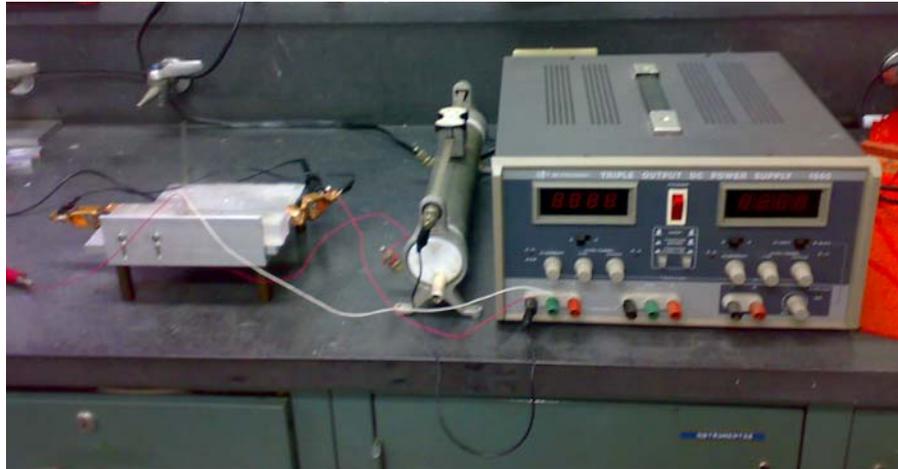


Figura 3.3.7 Montaje para la medición de conductividad estratificada.

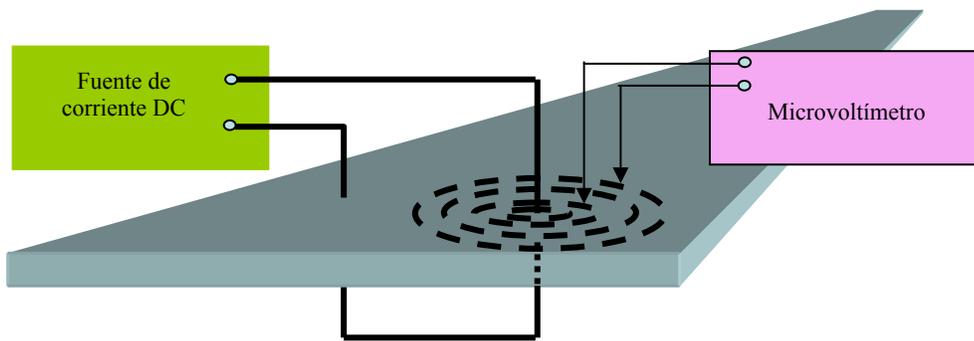


Figura 3.3.8. Disposición para la captura de datos experimentales. Los círculos concéntricos representan equipotenciales.

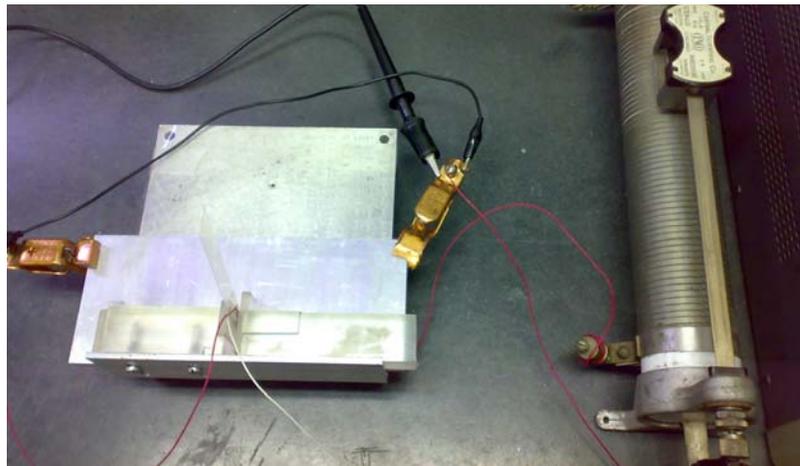


Figura 3.3.9 Medición de conductividad estratificada.

3.4 TRATAMIENTOS TERMICOS.

Luego de que las probetas se deformaron a distintos porcentajes y se midió su conductividad en la dirección de la deformación, en dirección transversal y estratificada, las mismas se sometieron a tratamientos térmicos de recuperación y recristalización con el objetivo de evaluar como cambia la conductividad eléctrica para distintos tiempos de calentamiento.

De cada probeta con un porcentaje de deformación se tomaron 3 muestras (figura 3.1.4), y se calentaron a 360°C en el horno del **Laboratorio de Metalografía de la EIM-UCV** (figura 3.4.1), para tiempos de ½ hora, 1 hora y 3 horas respectivamente. El enfriamiento fue de manera rápida en agua a temperatura ambiente; esto con el fin de mantener la microestructura y evitar la formación de precipitados.



Figura 3.4.1 *Horno del laboratorio de metalografía de la EIM*

Luego las condiciones producto de los tratamientos térmicos se evaluaron mediante los valores de conductividad que presenta el material. Dicha conductividad se obtuvo mediante el método de corrientes inducidas que nos proporcionó un

promedio de la conductividad en todas las direcciones de la muestra de material evaluada.

3.5 ENSAYO DE DUREZA.

Para obtener información relacionada con las propiedades mecánicas de un material, la superficie del mismo se sometió a una evaluación de dureza. Para caracterizar las muestras se seleccionó el ensayo de indentación Brinell realizado en el durómetro marca Future Tech Corp, modelo FV-700, serial N° FV7518, ubicado en el **Laboratorio de Lubricación y Desgaste de la EIM de la UCV** siguiendo las instrucciones del manual de operación del equipo (figura 3.5.1). El durómetro arroja directamente el valor de dureza Brinell.



Figura 3.5.1 *Durómetro del laboratorio de lubricación y desgaste de la EIM*

La carga aplicada fue de 10 kgf con un tiempo de aplicación de 5 segundos mediante un indentador esférico de acero de 1mm de diámetro. Se realizaron 5 indentaciones a cada una de las probetas.

3.6 EVALUACIÓN METALOGRÁFICA

Para analizar la estructura de grano del material se debe atacar la superficie (previamente pulida) del mismo, este procedimiento revela la estructura del material. Existen diversos métodos de ataque, el más utilizado es el de tipo químico que consiste en exponer la cara pulida de la muestra a un reactivo adecuado. Posteriormente se lava la muestra con abundante agua para retirar el reactivo, se enjuaga con alcohol o éter para desplazar el agua y se seca en corriente de aire.

Para la preparación de una muestra que será sometida a un examen microscópico es necesario primero producir en ella una superficie que se vea perfectamente plana y libre de rugosidad al ser vista con la ayuda de un microscopio. Esto implica primero la preparación de la superficie plana, y luego pulido para eliminar las marcas dejadas por el proceso anterior. El proceso de pulido provoca una muy fina capa de metal amorfo la cual oculta la estructura cristalina de la muestra. Con el fin de revelar su estructura cristalina, la muestra es entonces atacada con un reactivo adecuado, el cual disuelve la capa superficial del metal. [29]

La superficie de la muestra a la cual se le hizo el análisis metalográfico fue pulida con papel abrasivo de carburo de silicio de granulometrías de 320, 400, 500, 600, 1200, 1500 y 2000 en los equipos para pulido del **Laboratorio de metalografía de la EIM de la UCV** (figura 3.6.1). Luego para dejar la superficie con un acabado tipo espejo se pulió con un paño que fue colocado sobre el plato de la máquina para pulir, impregnado de una solución de agua con alúmina (óxido de aluminio: Al_2O_3) de $1\mu m$ y luego con una solución de óxido de cromo de $0,5\mu m$, dicho procedimiento

fue realizado en los equipos para pulido del **Laboratorio CITALA de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica-UCV** [30].



Figura 3.6.1. (a) *Equipo de pulido en forma manual*, (b) *Equipo de pulido con plato giratorio*.



Figura 3.6.2. *Muestras después de ser pulidas para el ensayo metalográfico*.

La superficie de cada una de las muestras se atacó con una solución de ácido fluorhídrico HF (48%) en agua al 2%. La inmersión en el reactivo fue durante un lapso de 10 segundos. Inmediatamente después cada una de las muestras se lavó con agua para retirar el reactivo, luego se impregnaron de 2-propanol y se secaron en aire caliente [30,31].

Posterior al ataque de la superficie de las muestras, se procedió a examinar las mismas en un microscopio marca OLYMPUS modelo PMG 3 del Laboratorio de Nuevos Materiales de la **Escuela de Ingeniería Metalúrgica-UCV**(figura 3.6.3), tomando fotografías de la superficie que muestra la estructura granular del material.



Figura 3.6.3 *Microscopio del laboratorio de nuevos materiales de la Escuela de Ingeniería metalúrgica.*

4. RESULTADOS Y ANALISIS.

4.1 ENSAYO DE TRACCIÓN.

Al llevar a cabo los ensayos de tracción para obtener las curvas experimentales de Esfuerzo-Deformación, se obtuvo un comportamiento como se muestra en las gráficas siguientes, donde se evidencia que efectivamente el material presenta una tendencia similar en las cuatro (4) probetas ensayadas.

Las tablas que muestran los valores (Esfuerzo-Deformación ingenieril) de los ensayos son citadas en el apéndice como tablas: A.1 (Probeta 1), A.2 (Probeta 2), A.3 (Probeta 3) y A.4 (Probeta 4). Así mismo los datos medidos en las probetas (área de sección transversal, longitud inicial y final) se muestran en la tabla A.5 del apéndice.

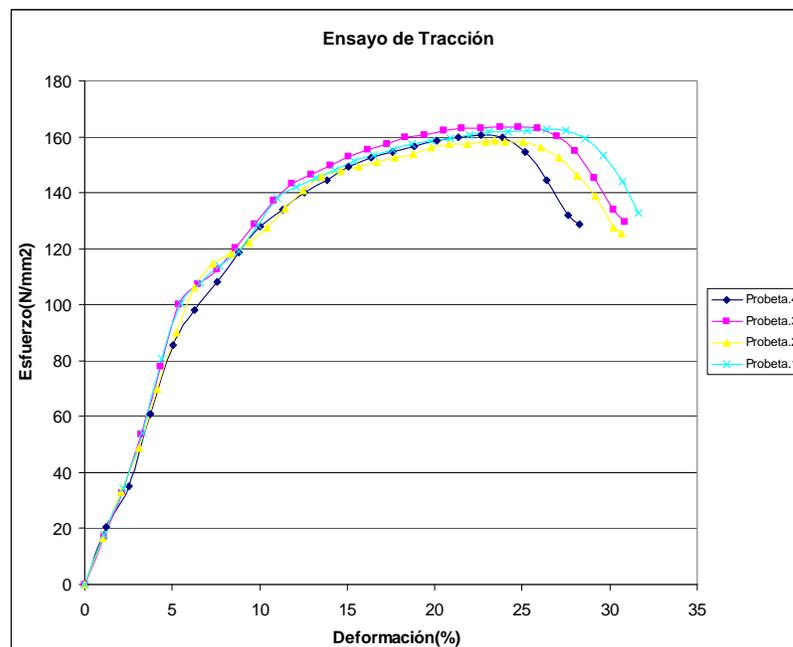


Figura 4.1.1 Curvas de esfuerzo-deformación para las 4 probetas ensayadas.

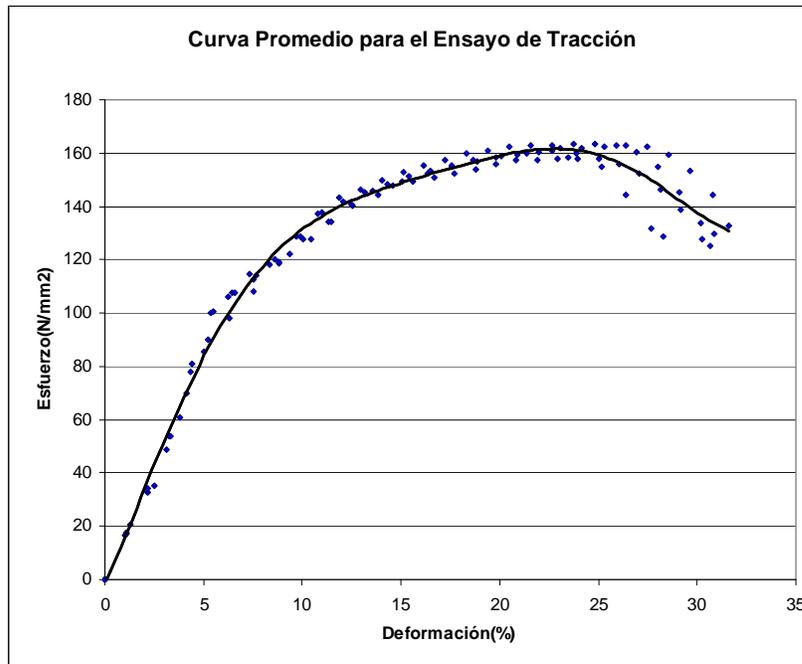


Figura 4.1.2 Curva esfuerzo-deformación promedio

La siguiente tabla (4.1) muestra los valores que se tomaron para la deformación de las probetas de prueba:

Tabla 4.1. Reporte para la deformación de las probetas a evaluar.

Probeta	Área transversal (mm ²)	Carga aplicada (kgf)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)
1	478,8	7000	143,3	7,8
2	480,0	7500	153,1	10,6
3	480,5	6000	122,4	4,2

4.2 MEDICIONES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.

4.2.1 Método de las 4 puntas.

4.2.1.1 Conductividad en la dirección de la deformación.

Las probetas sometidas a deformación se sometieron a un análisis de conductividad. Se tomaron 12 mediciones de corriente y voltaje para cada probeta, dichos datos se muestran en las tablas del apéndice: B.1 (Probeta 6063T6), B.2 (Probeta 6063), B.3 (Probeta 1), B.4 (Probeta 2), B.5 (Probeta 3). El área promedio de sección transversal medida de las probetas (6063T6 y 6063) se muestra en la tabla B.1.1 del apéndice y para las probetas (1, 2 y 3) en la tabla B.1.2. Las diferencias de potencial se tomaron para una distancia promedio entre cuchillas de 99,73 mm. Los valores de resistividad y conductividad promedio se muestran en la tabla (4.2.1) siguiente:

Tabla 4.2.1.1. *Reporte de resistividad y conductividad promedio para las probetas deformadas en dirección longitudinal.*

Probeta	Deformación (%)	Resistividad (Ohm*cm*10 ⁻⁶)	Conductividad Eléctrica (S/m)*10 ⁶
6063T6	0	3,276444736	30,52 ± 0,06
6063	0	3,42798975	29,17 ± 0,06
1	7,8	3,47658697	28,76 ± 0,06
2	10,6	3,50319138	28,55 ± 0,06
3	4,2	3,45292931	28,96 ± 0,06

La incertidumbre para los valores de conductividad por el método de las 4 puntas se obtuvo para una (1) desviación estándar con un nivel de confianza de 68,3 %, según la guía de la NIST (Instituto Nacional de Estandarización y Tecnología) para evaluar y expresar la incertidumbre [32]. Para calcular la incertidumbre de los multímetros se utilizó la guía HP del fabricante [33].

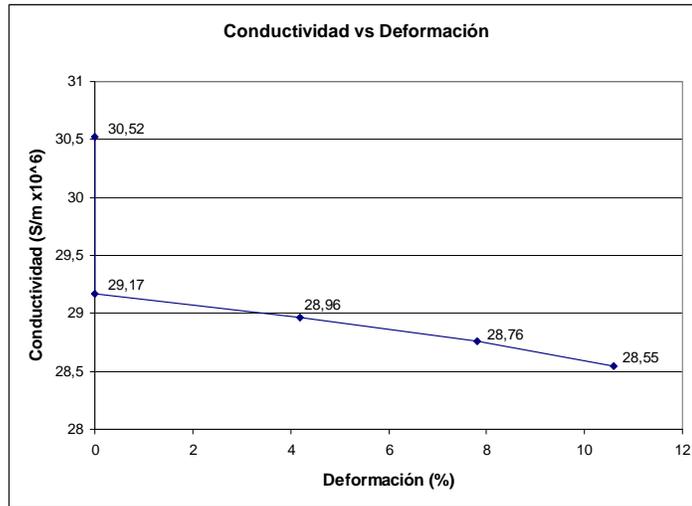


Figura 4.2.1 Gráfica que muestra la tendencia de la conductividad con el aumento de la deformación.

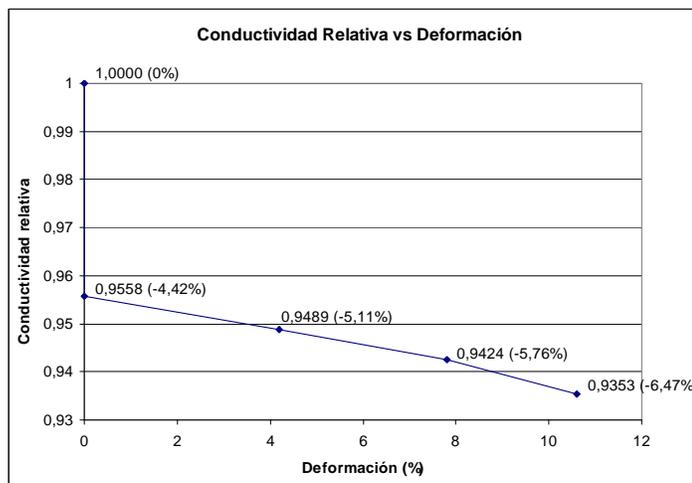


Figura 4.2.2 Gráfica que muestra el cambio relativo de la conductividad respecto al porcentaje de deformación.

Al aumentar la deformación disminuye la conductividad eléctrica, lo cual se evidencia en la figura 4.2.1. Se observa en la figura 4.2.2 que la disminución de la conductividad respecto a la deformación se encuentra alrededor del 0,7%.

El tratamiento de solubilización que se le hizo al material original con el objetivo de aumentar la ductilidad originó una disminución de la conductividad eléctrica en un 4,42%.

4.2.1.2 Conductividad en dirección transversal.

Se midió la conductividad en muestras de material que se sacaron de cada una de las probetas sometidas a tracción, en el material original y posteriormente solubilizado manteniendo 0% de deformación. Los valores de voltaje e intensidad de corriente se muestran en las tablas del apéndice: C.1 (Probeta 6063T6), C.2 (Probeta 6063), C.3 (Probeta 1), C.4 (Probeta 2) y C.5 (Probeta 3). El área promedio de sección transversal medida de las probetas (6063T6 y 6063) se muestra en la tabla C.1.1 del apéndice y para las probetas (1, 2 y 3) en la tabla C.1.2. Las diferencias de potencial se tomaron para una distancia promedio entre cuchillas de 21,00 mm. Los valores de resistividad y conductividad promedio se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.2.1.2. *Reporte de resistividad y conductividad promedio para las probetas deformadas en dirección transversal.*

Probeta	Deformación (%)	Resistividad (Ohm*cm*10⁻⁶)	Conductividad Eléctrica (S/m)*10⁶
6063T6	0	3,231339303	30,9 ± 0,1
6063	0	3,378019085	29,6 ± 0,1
1	7,8	3,422443173	29,2 ± 0,1
2	10,6	3,455165383	28,9 ± 0,1
3	4,2	3,411148392	29,3 ± 0,1

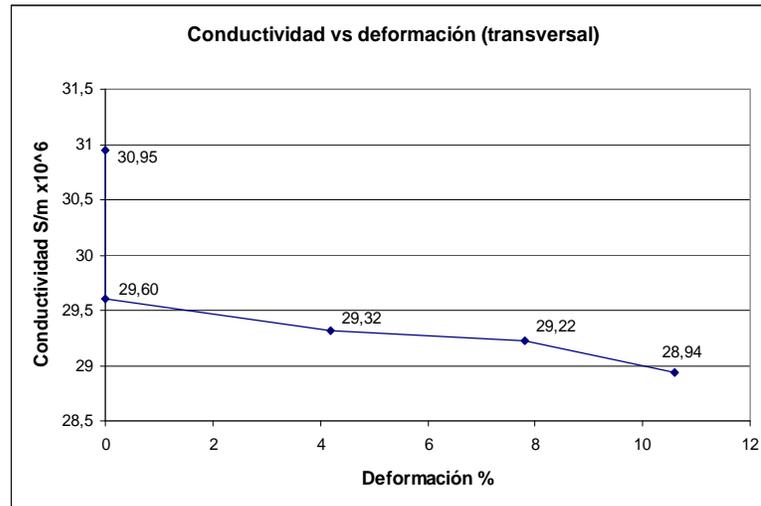


Figura 4.2.3 Gráfica que muestra la tendencia de la conductividad en dirección transversal a la deformación.

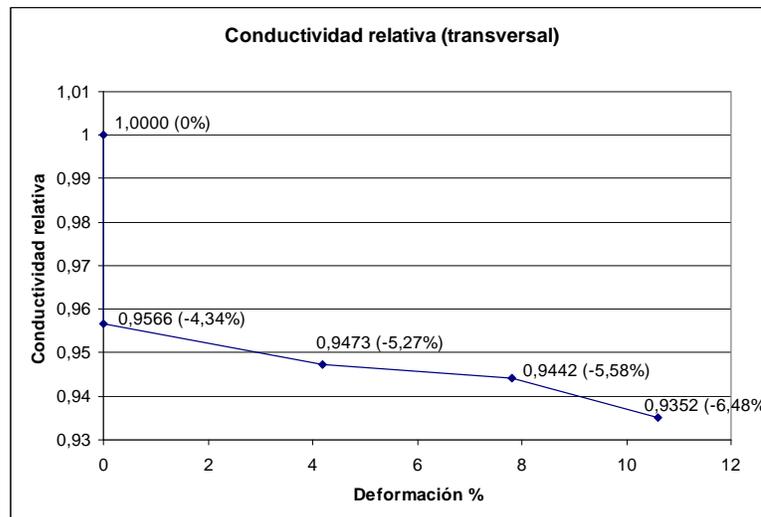


Figura 4.2.4 Gráfica que muestra el cambio relativo de la conductividad en dirección transversal respecto al porcentaje de deformación.

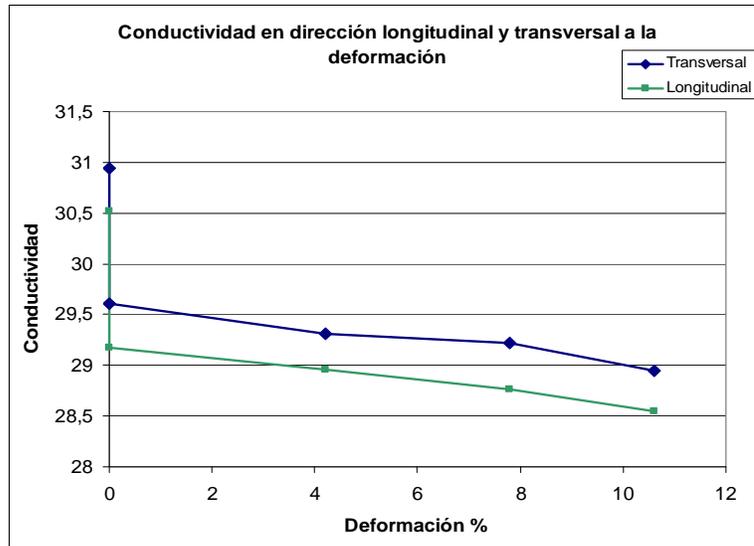


Figura 4.2.5 Gráfica que muestra la tendencia de la conductividad por el método de las 4 puntas tanto en dirección longitudinal como en la transversal.

En la figura anterior se evidencia una tendencia similar de la conductividad tanto en la dirección de la deformación como en la dirección transversal a la misma, lo cual nos muestra que la influencia de la deformación sobre la conductividad en ambas direcciones es proporcional en el rango de deformaciones que trabajamos.

Se puede apreciar también una considerable disminución de la conductividad eléctrica con la solubilización; esto se puede deber a que al tener el material en solución sólida sobresaturada, las trayectorias medias libres donde circulan los electrones se hacen más cortas debido a la distribución aleatoria de los átomos intersticiales o sustitucionales de los aleantes [4].

Respecto a la conductividad eléctrica del aluminio puro ($37,8 \times 10^6$ S/m) el material endurecido por envejecimiento presenta una menor reducción de dicha propiedad; esto se debe a que entre los precipitados existe una trayectoria media libre más larga.

Se puede apreciar que la conductividad disminuye con el aumento del trabajo en frío debido a que aumenta la densidad de dislocaciones y otros defectos cristalinos.

El endurecimiento por deformación, para los porcentajes de deformación estudiados, tuvo un efecto menos significativo sobre la conductividad que la solubilización, este hecho podría atribuirse a que en la solución sólida las dislocaciones y los bordes de grano se encuentran más alejados entre si que los átomos aleantes.

4.2.2 Método de Corrientes de Eddy.

4.2.2.1 Medición de la conductividad eléctrica a las probetas sin tratamiento térmico.

Se procedió a medir los valores de conductividad por el método de corrientes inducidas, para verificar la veracidad de los datos que se obtienen por este método al ser comparados con los arrojados por el método convencional de las 4 puntas.

Tomando como valor de referencia la resistividad medida por el método convencional de una muestra de material original 6063T6, que representa 0 divisiones en el equipo de corrientes inducidas correspondiente a una ganancia de 40dB. Las divisiones que se tomaron del equipo para cada una de las probetas se muestran en la tabla D del apéndice. El número de divisiones promedio, además de los valores de resistividad y conductividad para cada una de las probetas evaluadas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.2.2.1. Reporte de conductividad promedio por corrientes inducidas.

Probeta	N° Divisiones (40dB)	Resistividad (Ohm*cm*10 ⁻⁶)	Conductividad Eléctrica (S/m)*10 ⁶
6063T6	0	3,276444736	30,52 ± 0,04
6063	12,01	3,4079094	29,34 ± 0,04
1	13,03	3,41900783	29,25 ± 0,04
2	13,67	3,42600152	29,19 ± 0,04
3	12,58	3,41414286	29,29 ± 0,04

La incertidumbre para los valores de conductividad por el método de Corrientes de Eddy se obtuvo para una (1) desviación estándar con un nivel de confianza de 68,3%, según la guía de la NIST para evaluar y expresar la incertidumbre [32].

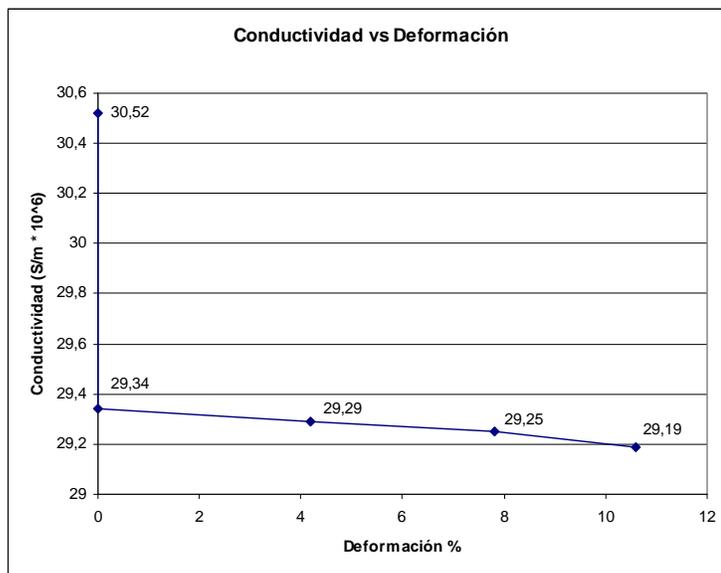


Figura 4.2.6 Gráfica que muestra la tendencia de la conductividad por el método de corrientes inducidas.

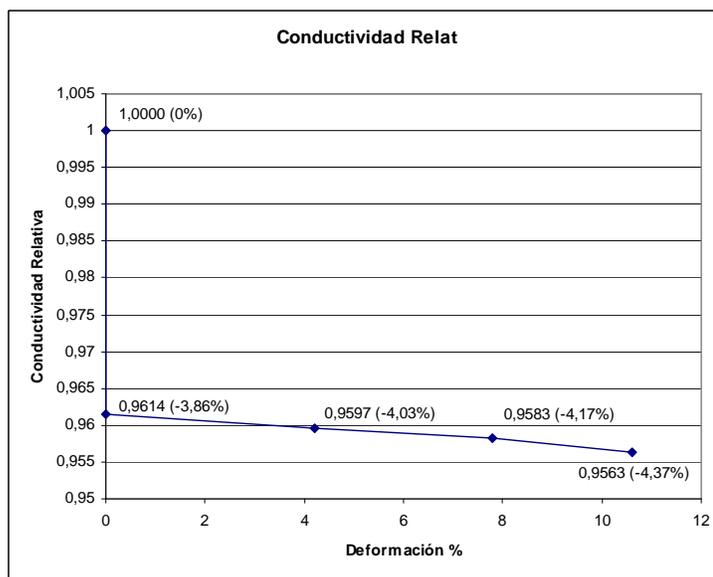


Figura 4.2.7 Gráfica que muestra el cambio relativo de la conductividad respecto al porcentaje de deformación por el método de corrientes inducidas.

En la figura 4.2.6 se observa el mismo comportamiento que en el método de las cuatro puntas, al aumentar la deformación disminuye la conductividad eléctrica.

En la figura 4.2.7 se evidencia que la disminución de la conductividad respecto a cada porcentaje de deformación se encuentra alrededor del 0,17%.

El tratamiento de solubilización aplicado al material originó una disminución de la conductividad eléctrica en un 3,86%.

Se evidencia nuevamente que la disminución de la conductividad debido a la deformación en frío es menos significativa que la producida por el tratamiento de solubilización.

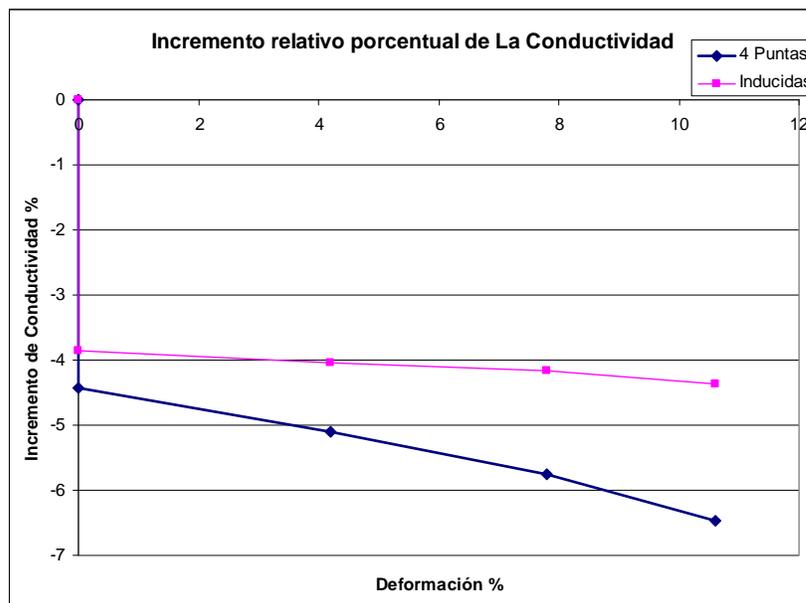


Figura 4.2.8 Gráfico comparativo del incremento relativo de la conductividad para diferentes porcentajes de deformación.

En esta gráfica se observa que el método de corrientes inducidas es menos sensible al cambio de conductividad debido al tratamiento de solubilización que el método de las cuatro puntas, ya que el porcentaje de disminución de la conductividad

respecto al material original (envejecido) es de 3,86% y 4,42% respectivamente. Igualmente el método de corrientes inducidas mostró menor variación en la conductividad respecto al porcentaje de deformación que el método de las cuatro puntas.

El comportamiento mostrado en la figura se debe a que el flujo de corriente que es inducido en el material por el método de corrientes de Eddy nos da una lectura de la conductividad en las capas cercanas a la superficie, que además de representar un volumen menor respecto al volumen total de la probeta, en ésta se presenta una discontinuidad por la interfaz entre el metal y el medio externo; por el contrario, en el método de las 4 puntas la corriente circula de manera uniforme a través de toda el área de sección transversal de las probetas abarcando todo el volumen del material, por lo tanto es menos afectado por la condición de la superficie.

Otra causa es la anisotropía en el material ya que las corrientes inducidas proporcionan un promedio de los cambios en las propiedades en todas las direcciones, lo cual reveló una disminución de la conductividad menos significativa con el aumento de la deformación al ser comparado con el método de las cuatro puntas, que reveló el cambio de la conductividad en una sola dirección (en este caso la de deformación).

4.2.2.2 Medición de la conductividad eléctrica a las probetas con tratamiento térmico.

Tres (3) muestras de cada probeta deformada se sometieron a tratamiento térmico de recuperación y recristalización durante ½ hora, 1 hora, y 3 horas.

Los resultados en los cambios de las propiedades mecánicas del material se correlacionan con la medición de conductividad eléctrica. El material que ha disminuido su resistencia y dureza aumentando su ductilidad debe presentar un comportamiento eléctrico distinto como consecuencia de disminuir el grado de

deformación que sufrió durante el trabajo en frío. El tratamiento de recocido permitió recuperar plasticidad en el material.

Se tomaron 15 números de divisiones para cada tiempo de tratamiento térmico en la muestra. Las divisiones registradas con el equipo de inducidas para diferentes periodos de tiempo se muestran en las tablas del apéndice: para la Probeta 1: E.1; Probeta 2: E.2; Probeta 3: E.3.

A continuación se presentan las tablas para cada probeta con los valores promedios de las divisiones, resistividad y conductividad que se calculan a partir de las mediciones hechas con el método de corrientes inducidas.

Tabla 4.4.2.2. *Valores de conductividad para las probeta 1 con tratamiento térmico por corrientes inducidas.*

Probeta N° 1. (7,8%)	N° Divisiones (40dB)	Resistividad (Ohm*cm*10⁻⁶)	Conductividad Eléctrica (S/m)*10⁶
½ hora	4,37	3,22860049	30,97 ± 0,04
1 hora	3,28	3,24045914	30,86 ± 0,04
3 horas	8,97	3,17824681	31,46 ± 0,04

Tabla 4.4.2.3. *Valores de conductividad para las probeta 2 con tratamiento térmico por corrientes inducidas.*

Probeta N° 2. (10,6%)	N° Divisiones (40dB)	Resistividad (Ohm*cm*10⁻⁶)	Conductividad Eléctrica (S/m)*10⁶
½ hora	3,02	3,24337820	30,83 ± 0,04
1 hora	4,98	3,22185017	31,04 ± 0,04
3 horas	10,5	3,16146225	31,63 ± 0,04

Tabla 4.4.2.4. *Valores de conductividad para las probeta 3 con tratamiento térmico por corrientes inducidas.*

Probeta N° 3. (4,2%)	N° Divisiones (40dB)	Resistividad (Ohm*cm*10⁻⁶)	Conductividad Eléctrica (S/m)*10⁶
½ hora	0,02	3,276217559	30,52 ± 0,04
1 hora	5,1	3,220573093	31,05 ± 0,04
3 horas	9,8	3,169124766	31,55 ± 0,04

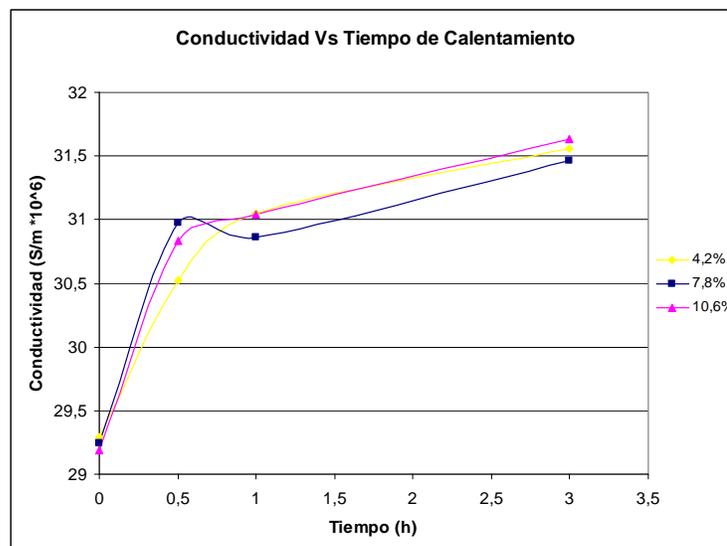


Figura 4.2.9 *Gráfico de la conductividad de las probetas tratadas térmicamente en relación con el tiempo de tratamiento.*

En la gráfica se muestra un aumento considerable de la conductividad con el tratamiento térmico, el mayor incremento se da durante la primera media hora, donde se presume que la recuperación se ha alcanzado casi por completo; luego la conductividad sigue aumentando en menor proporción, durante el proceso de recristalización. Para un tiempo de tres horas se tienen las probetas recristalizadas y por lo tanto una conductividad aún mayor.

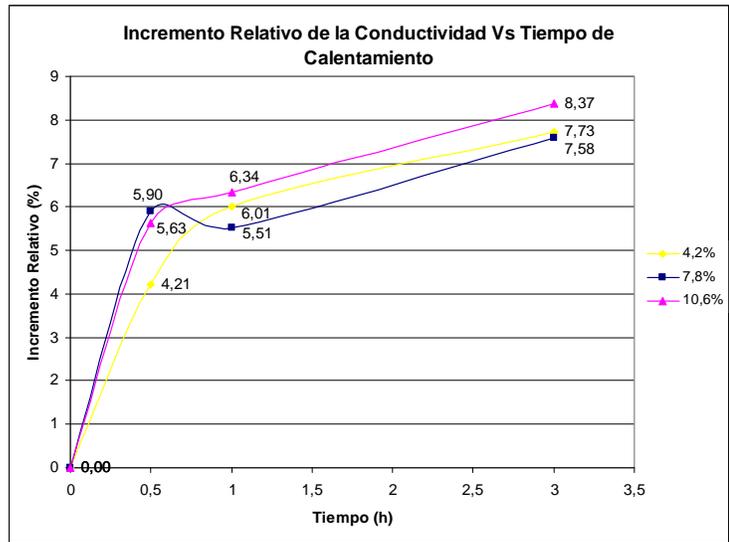


Figura 4.2.10 Gráfica del incremento relativo porcentual de la conductividad respecto al tiempo de tratamiento térmico.

Este gráfico expresa de forma porcentual el aumento de la conductividad de cada probeta con respecto a los valores iniciales de las mismas. Se puede apreciar que la probeta que finalmente obtuvo una mayor restauración de esta propiedad fue aquella que sufrió mayor deformación o trabajo en frío, esto se debe a que entre más energía se encuentre almacenada en la probeta producto de esfuerzos internamente equilibrados, más rápida será su recuperación ya que ésta energía es la fuerza motriz que induce dicho proceso.

Vemos el caso de la probeta con 7,8% de deformación que presenta una restauración muy rápida de la conductividad, para un tiempo de media hora, y luego ésta cae en una hora de tratamiento por debajo del valor obtenido. Este comportamiento resulta fuera de la tendencia.

4.2.3 Conductividad Estratificada.

Las variaciones de la conductividad dependientes de la profundidad respecto a la superficie de las muestras son menores que la incertidumbre de la medición, por lo tanto no son significativas. El espesor y número de láminas de separación permitió

medir la conductividad de los diferentes estratos hasta una profundidad menor de 1mm. Tomando en cuenta que el espesor de las probetas utilizadas estaba alrededor de 8mm, los datos de diferencia de potencial obtenidos no fueron suficientes para obtener resultados concluyentes. Si se aumentaba el número de láminas y con éstas la separación entre los electrodos las diferencias de potencial medidas serian muy bajas.

4.3 MEDICIÓN DE DUREZA.

4.3.1 Medición de dureza para las probetas sin tratamiento térmico.

Se midieron 5 valores de dureza para la probeta solubilizada y las trabajadas en frío (ver tabla F.1 en el apéndice). Luego de ser deformado, el material se sometió a un proceso de recuperación y recristalización por lo cual experimentó un cambio de dureza que se obtuvo tomando 5 mediciones para cada caso (ver tablas en el apéndice: Probeta 1: F.1.1; Probeta 2: F.1.2; Probeta 3: F.1.3). Se presentan en las siguientes tablas los valores promedios de dureza:

Tabla 4.3.1. *Valores promedio de las mediciones de dureza para el material original, solubilizado y trabajado en frío.*

Probeta	Valores de Dureza (HB)
6063T6	60,44
6063	43,68
1 (7,8%)	52,26
2 (10,6%)	55,36
3 (4,2%)	48,76

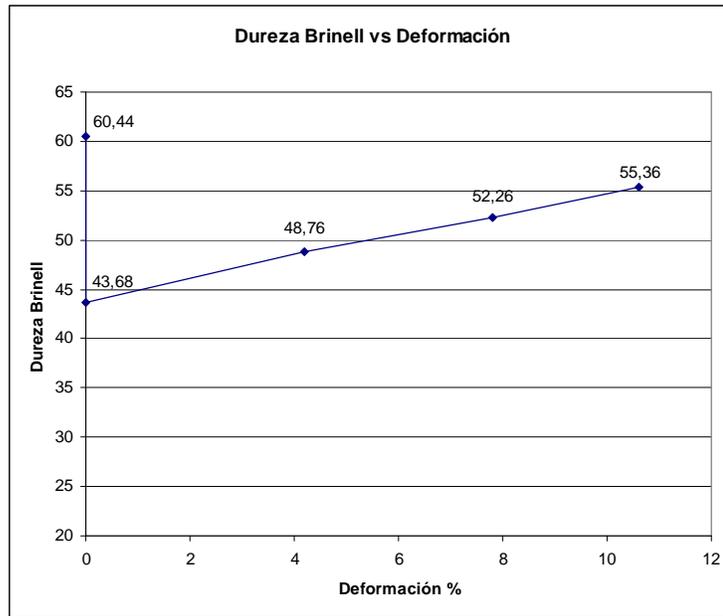


Figura 4.3.1.1. Gráfica que muestra la dureza respecto al porcentaje de deformación.

La gráfica muestra una disminución considerable de la dureza del material al ser solubilizado; esto se debe a que el material originalmente presentaba un endurecimiento por precipitación, donde los elementos aleantes (en este caso Mg y Si) precipitan en forma de partículas (Mg_2Si) en la matriz α dificultando el movimiento de las dislocaciones; una vez solubilizado el material, los elementos de aleación forman una solución sólida sobresaturada con el material base, en el cual pasan a formar parte como átomos intersticiales y/o sustitucionales y teniendo un menor aporte en la dureza del material.

Se observa también un incremento de la dureza con el aumento del porcentaje de deformación en frío, evidenciándose el endurecimiento por deformación, el cual se produce debido al aumento en la densidad de dislocaciones y por lo tanto el incremento de fronteras de grano.

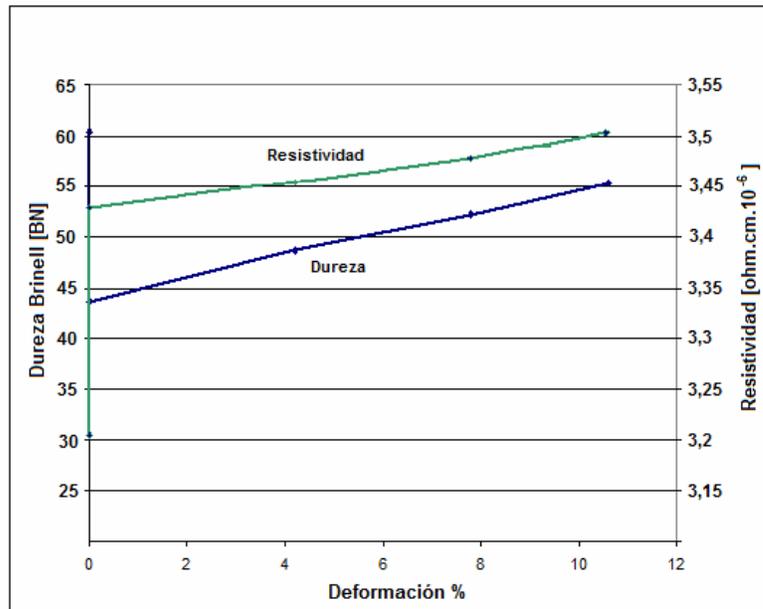


Figura 4.3.1.2. Gráfica que muestra la dureza y la resistividad en la dirección de la deformación respecto al porcentaje de deformación.

La gráfica muestra la relación entre la dureza y la resistividad eléctrica del metal respecto al porcentaje de deformación, se observa que existe una correlación directa entre ambas propiedades, ya que tanto la dureza como la resistividad aumentan con el incremento del trabajo en frío. Respecto al tratamiento de solubilización, la relación no es directa entre ambas propiedades, se puede apreciar que la resistividad eléctrica aumenta significativamente mientras que la dureza disminuye.

4.3.2 Medición de dureza para las probetas con tratamiento térmico.

Tabla 4.3.2.1. *Valores promedio de las mediciones de dureza para la Probeta 1 con distintos periodos de tratamiento térmico.*

Probeta N° 1. (7,8%)	Valores de Dureza (HB)
½ hora	36,72
1 hora	34,8
3 horas	31,32

Tabla 4.3.2.2. *Valores promedio de las mediciones de dureza para la Probeta 2 con distintos periodos de tratamiento térmico.*

Probeta N° 2. (10,6%)	Valores de Dureza (HB)
½ hora	37,42
1 hora	35,28
3 horas	30,22

Tabla 4.3.2.3. *Valores promedio de las mediciones de dureza para la Probeta 3 con distintos periodos de tratamiento térmico.*

Probeta N° 3. (4,2%)	Valores de Dureza (HB)
½ hora	35,16
1 hora	34,36
3 horas	30,18

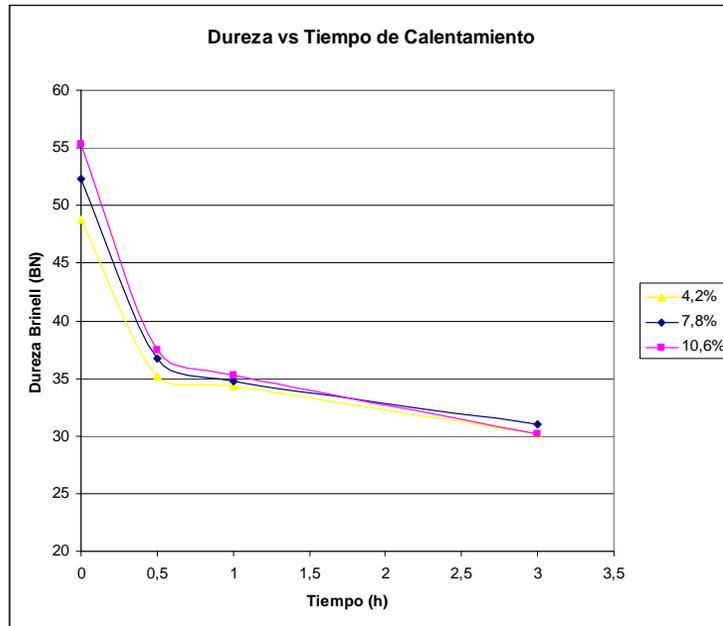


Figura 4.3.2. Gráfica que muestra el comportamiento de la dureza respecto a los tiempos de tratamiento térmico.

En la gráfica 4.3.2 se evidencia que la dureza disminuye al aumentar los lapsos de tiempo de tratamiento térmico. Esto se explica debido a que la dureza disminuye por la fracción volumétrica de granos libres de deformación que sustituyen progresivamente los granos deformados durante la etapa de recristalización.

Al completarse la recristalización las tres probetas mostraron valores de dureza muy cercanos, lo cual nos indica que se tiene una microestructura similar.

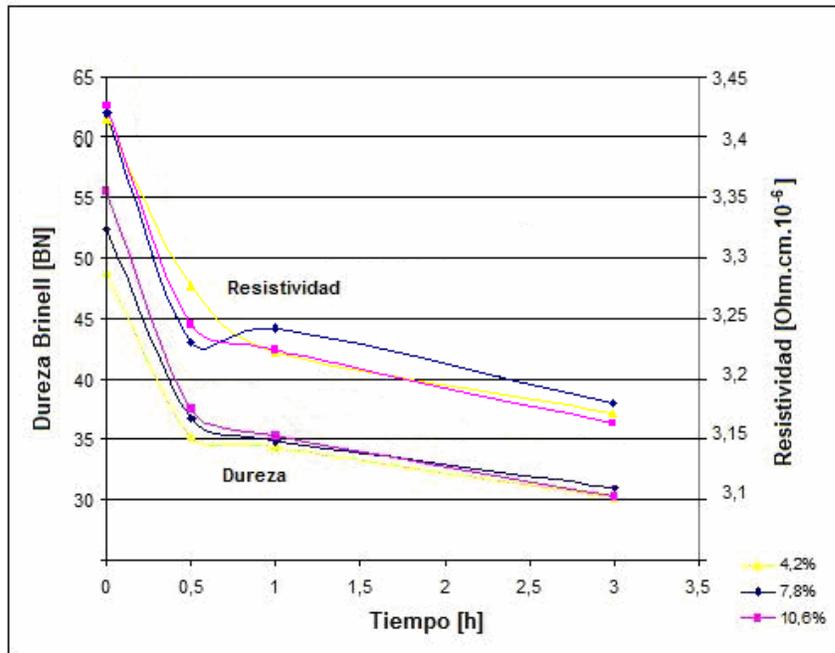


Figura 4.3.3. Gráfica que muestra el comportamiento de la dureza y la resistividad respecto a los tiempos de tratamiento térmico.

En el gráfico anterior se observa un comportamiento similar de la dureza y la resistividad eléctrica respecto al tiempo de tratamiento térmico, ambas propiedades disminuyen a medida que el material se somete a tiempos más prolongados de tratamiento.

Tanto la dureza como la resistividad disminuyen en mayor medida durante la primera media hora de tratamiento térmico, luego disminuye en menor proporción.

4.4 ENSAYO METALGRÁFICO.

Finalmente para evaluar la evolución microestructural que experimentó el material como consecuencia del trabajo en frío y de los tratamientos térmicos se realizó un estudio metalográfico.

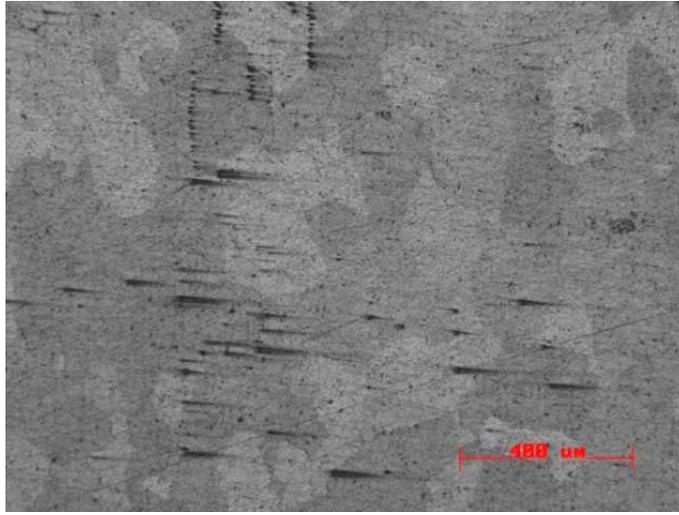


Figura 4.4.1. *Material original (Aluminio 6063T6).*

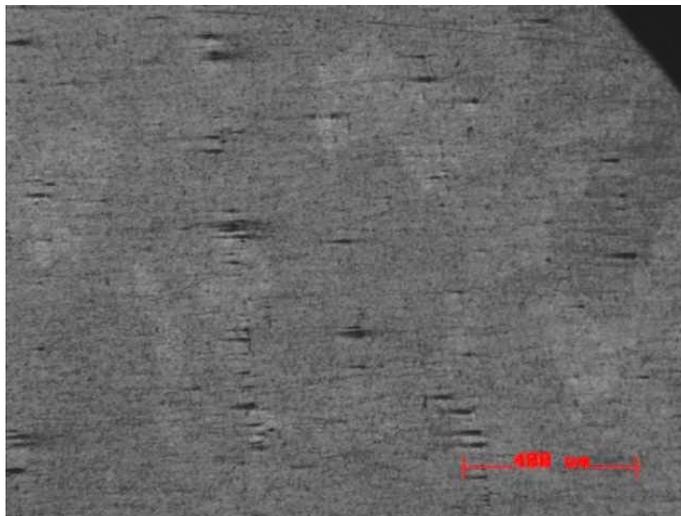


Figura 4.4.2. *Material solubilizado.*

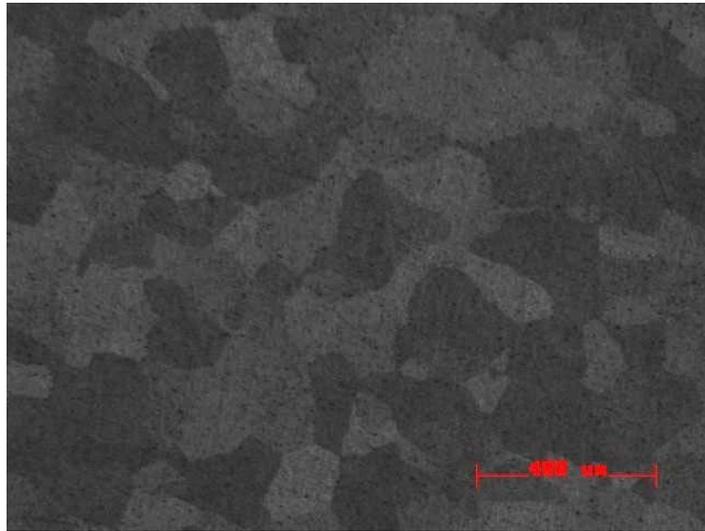


Figura 4.4.3. *Probeta con 4,2% de deformación. HF (2%)*

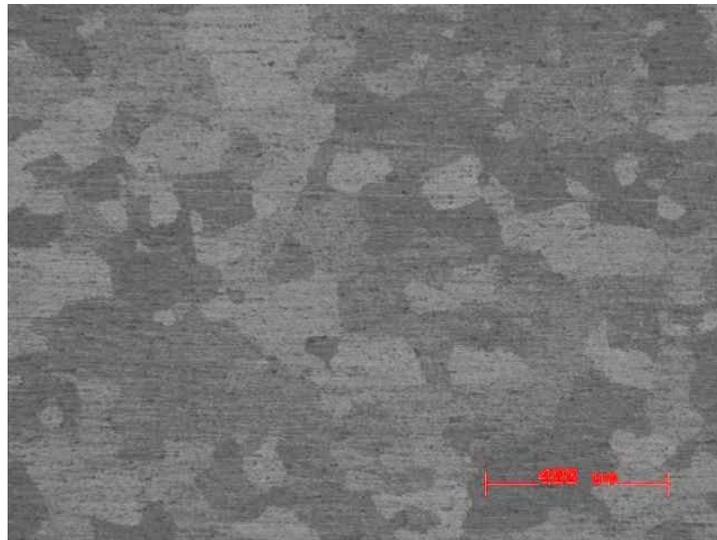


Figura 4.4.4. *Probeta 3.- 4,2% de deformación. ½ hora de TT. HF (2%)*

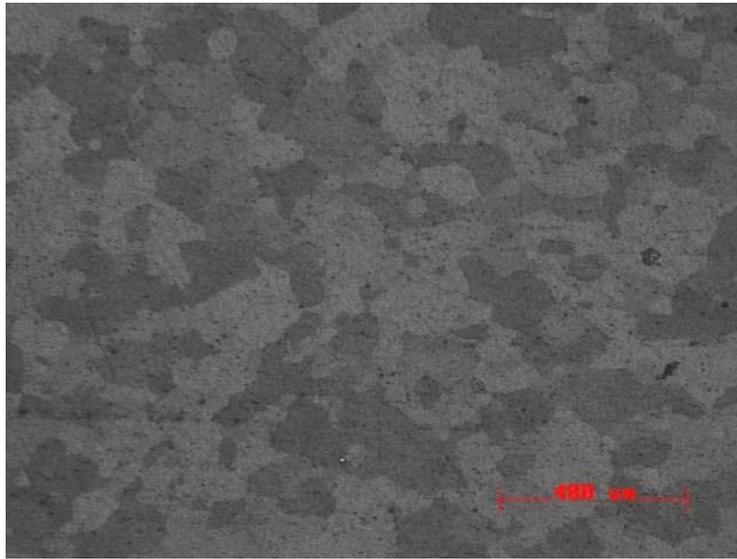


Figura 4.4.5. *Probeta 3.- 4,2% de deformación. 1 hora de TT. HF (2%)*

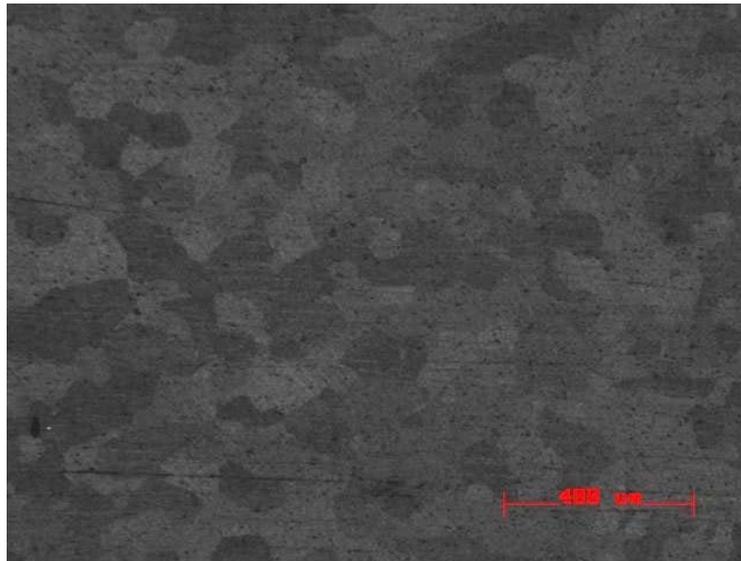


Figura 4.4.6. *Probeta 3.- 4,2% de deformación. 3 horas de TT. HF (2%)*

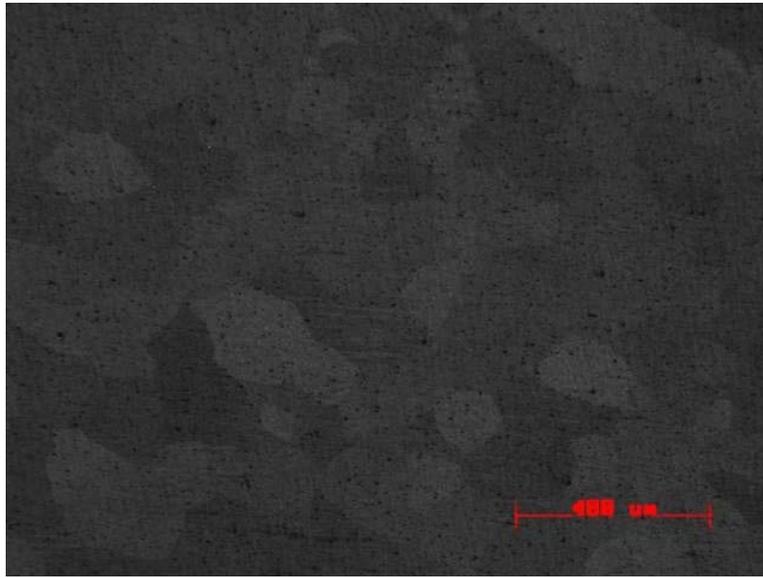


Figura 4.4.7. *Probeta 1.- 7,8% de deformación. HF (2%)*

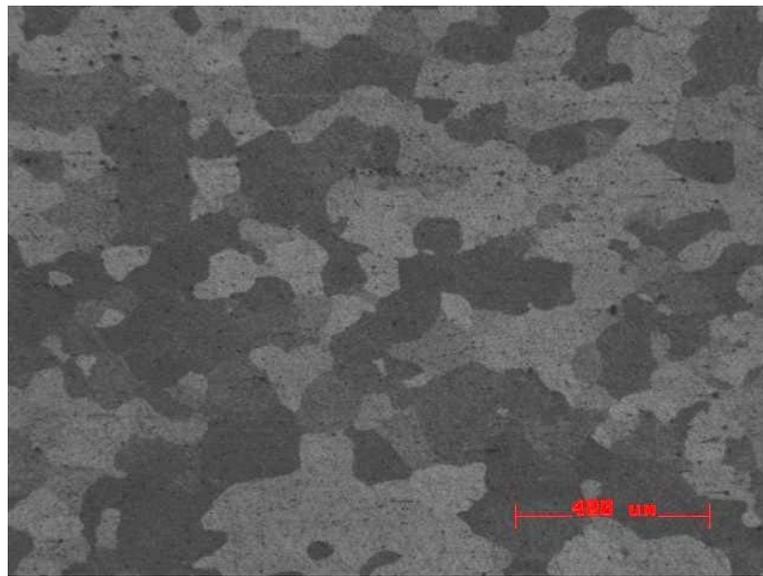


Figura 4.4.8. *Probeta 1.- 7,8% de deformación con ½ hora de TT. HF (2%)*

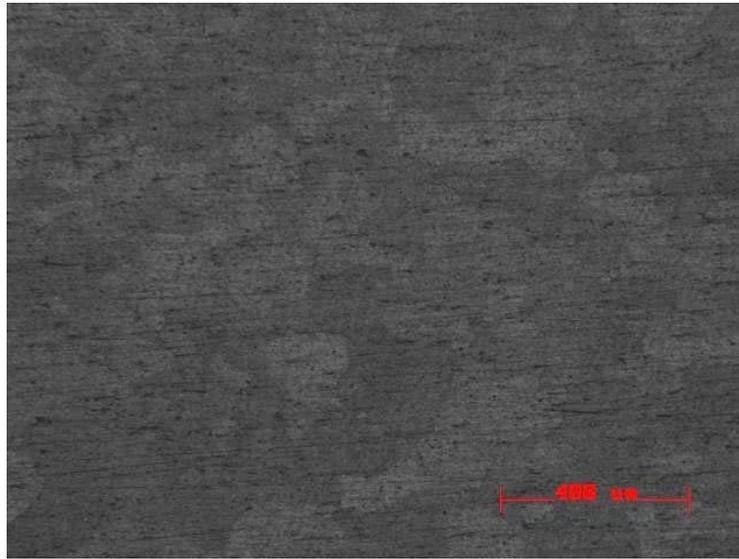


Figura 4.4.9. *Probeta 1.- 7,8% de deformación con 1 hora de TT. HF (2%)*

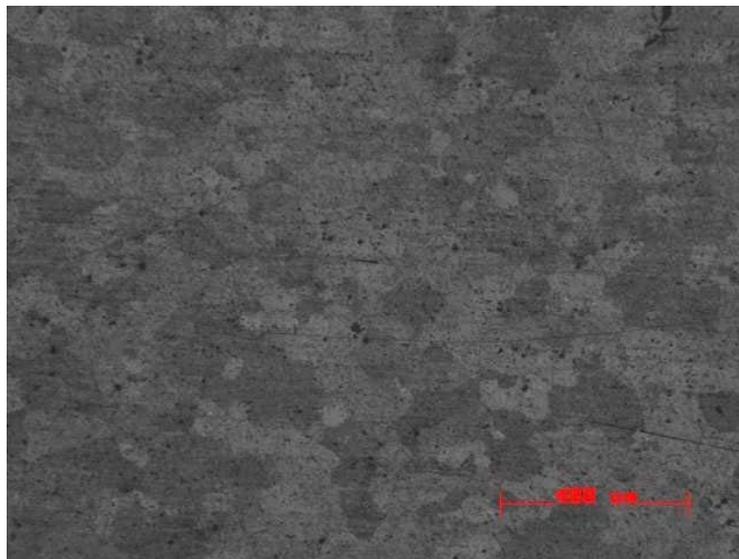


Figura 4.4.10. *Probeta 1.- 7,8% de deformación con 3 horas de TT. HF (2%)*

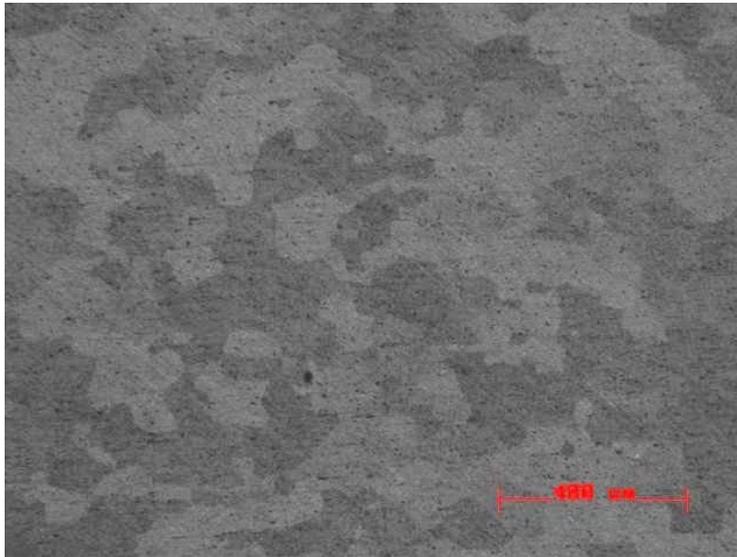


Figura 4.4.11. *Probeta 2.- 10,6% de deformación. HF (2%)*

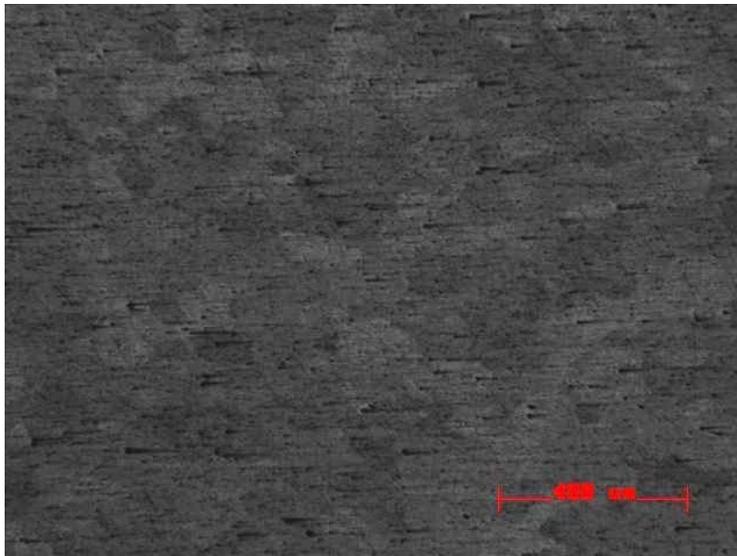


Figura 4.4.12. *Probeta 2.- 10,6% de deformación con ½ hora de TT. HF (2%)*

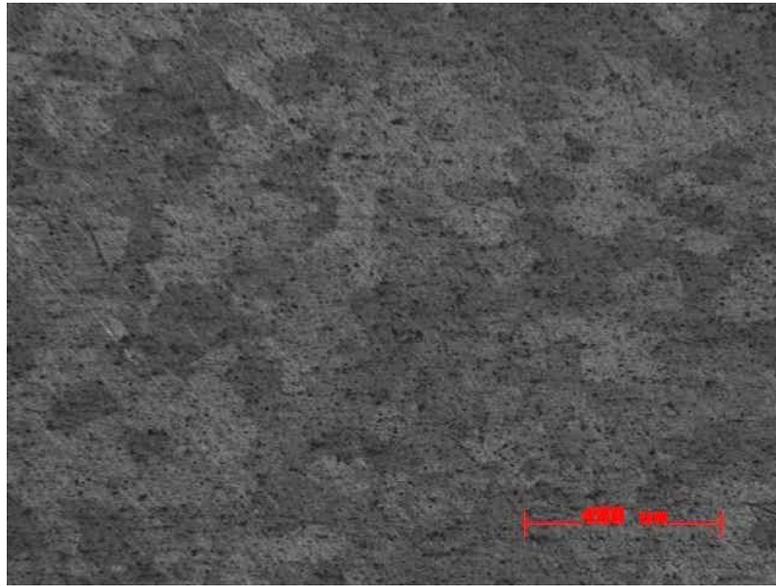


Figura 4.4.13. *Probeta 2.- 10,6% de deformación con 1 hora de TT. HF (2%)*

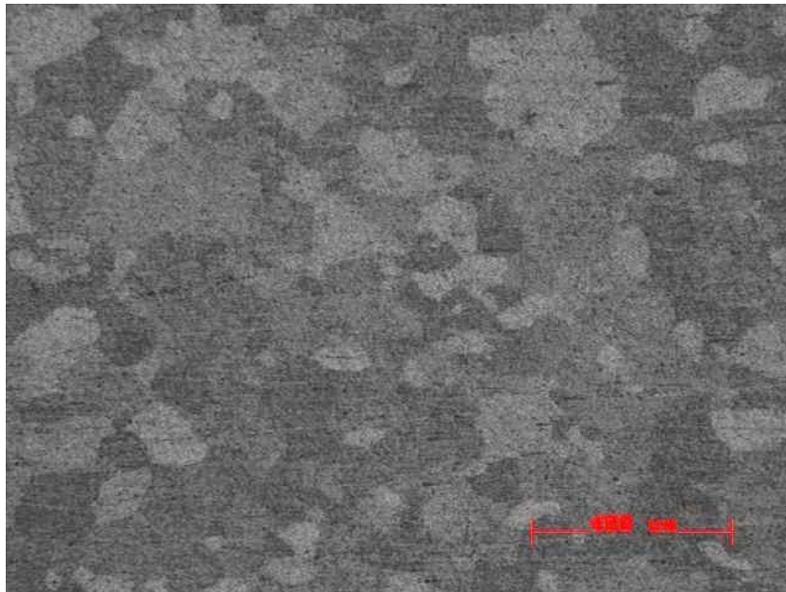


Figura 4.4.14. *Probeta 2.- 10,6% de deformación con 3 horas de TT. HF (2%)*

Del estudio metalográfico que se realizó en el material se observó la aparición de pequeños granos sin ninguna orientación preferencial que se presume son granos recristalizados en las probetas con $\frac{1}{2}$ hora de TT respecto al material sin TT (sólo deformado), lo cual evidencia el comienzo de la recristalización y por lo tanto se presume que el material tiene un alto grado de recuperación.

La recuperación se sigue produciendo de manera simultánea al proceso de recristalización ya que el material producto de la difusión atómica continua buscando liberar la energía internamente almacenada.

En las probetas con $\frac{1}{2}$ hora de TT se observa una pequeña diferencia en la cantidad de granos recristalizados, siendo mayor ésta a mayores porcentajes de deformación. Esto demuestra que al existir mayor deformación en el material el avance del proceso de recristalización se produce de manera más rápida.

Para cada grupo de probetas de igual porcentaje de deformación, se puede apreciar que a medida que aumenta el tiempo de TT, el número de nuevos granos (recristalizados) aumenta hasta llegar a sustituir casi por completo los granos originales.

En relación a la dureza del material, esta propiedad disminuye con el aumento del tiempo de tratamiento térmico, evidenciándose el mayor cambio durante la primera etapa, en la que se asume que el material se recuperó casi por completo. La misma tendencia se observa en la conductividad eléctrica respecto al tiempo de TT, donde esta propiedad aumenta significativamente en la primera etapa ($0 - \frac{1}{2}$ h).

5. CONCLUSIONES.

- El trabajo en frío disminuye la conductividad eléctrica del metal estudiado, mientras que el envejecimiento hace que esta aumente.
- La conductividad eléctrica del aluminio 6063 disminuye en mayor medida debido al tratamiento de solubilización que por trabajo en frío para los porcentajes de deformación estudiados en esta investigación.
- La conductividad eléctrica crece al realizar un tratamiento de recocido al material deformado, lo cual resulta conveniente para mejorar las propiedades eléctricas y la ductilidad del material.
- El método de corrientes inducidas es menos sensible a los cambios de conductividad producidos, tanto por deformación como por el tratamiento de solubilización, que el método de las cuatro puntas.
- Para bajos porcentajes de deformación se dificulta la caracterización del material por el método de corrientes inducidas.
- El endurecimiento por deformación no es la mejor forma de obtener una alta resistencia mecánica en el aluminio 6063 si se desea que tenga una alta conductividad eléctrica; el envejecimiento, por su parte, proporciona una resistencia mecánica aún mayor aumentando al mismo tiempo la conductividad eléctrica.
- Durante el proceso de recocido la etapa de recuperación es la que provoca un mayor aumento de la conductividad eléctrica en el Aluminio 6063.

- El método de las cuatro puntas resulta más preciso al momento de medir la conductividad del material pero menos práctico para el control de las propiedades en un proceso de producción continuo.

6. RECOMENDACIONES.

- Realizar el estudio para mayores porcentajes de trabajo en frío, utilizando otros procesos que permitan obtener mayores deformaciones, como por ejemplo laminación en frío.
- Para la medición de conductividad por el método de las cuatro puntas se recomienda preparar probetas con un área de sección transversal pequeña y gran longitud, de esta forma se obtiene una mayor caída de tensión entre los extremos de la probeta y, por lo tanto, una medición más precisa.
- Realizar el ensayo por el método de corrientes inducidas a diferentes frecuencias, con el fin de estudiar la conductividad a diferentes profundidades respecto a la superficie de la probeta.
- Evaluar la conductividad eléctrica en el Aluminio 6063 sometido a distintas etapas de envejecimiento, para caracterizar este proceso de endurecimiento por precipitación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1].Callister, William. 2001. Fundamentals of Materials Science and Engineering. New York . Fifth Edition.
- [2].ASM Metals Handbook. 1991. Mechanical Testing and Evaluation. Volumen 8.
- [3].Groover, Mikell P. 1997. Fundamentos de Manufactura Moderna, Materiales, Procesos y sistemas. Prentice-Hall México.
- [4].Askeland, Donald R. 2004. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. México. Cuarta Edición.
- [5].Kalpakjian, Schmid. 2002. Manufactura. Ingeniería y Tecnología. Cuarta Edición. Prentice-Hall México.
- [6].Bardes B. 1978. Manual de Metales: Propiedades y Selección: Hierros y Aceros, Vol. 1, 9na edición, ASM.
- [7].Baker H. 1979. Manual de Metales: Propiedades y Selección: Aleaciones no ferrosas y metales puros, Vol. 2, 9na Edición, ASM. p. 276 y 327.
- [8].Lajtin, Yu. 1977. Metalografía y tratamientos térmicos de los metales. Editorial MIR. Moscú. Segunda edición.
- [9].Higgins, Raymond A. 1993. Engineering Metallurgy: Applied Physical Metallurgy. Hodder Headline Group New York. Sixth Edition.
- [10].Gorelik, S.S. 1981. Recrystallization in metals and Alloys. MIR Publishers. Moscow.
- [11].Flinn, Trojan. 1994. Materiales de Ingeniería y sus aplicaciones. Tercera Edición. México.
- [12].Novikov I. 1978. Theory of Heat Treatment of Metals. Editorial: Mir Publishers. Moscow.
- [13].Rajkumar K.V, Rao B.P.C, Sasi B, Jayakumar T, Ray K.K. Febrero 2007. Characterization of aging behaviour in M250 grade maraging steel using eddy current non-destructive methodology. Science Direct.

- [14].Hagamaier D, Kleint J. R. 1964. Conductivity measurements for characterization of the microstructure in aluminium alloys of various tempering treatment. *Metal Progress*. p.115–118.
- [15].Hagamaier D. 1981. Characterization in aluminium 7075T6 alloy using eddy current. *Material Evaluating*. p. 962–969.
- [16].Rosen M, Ives L, Ridder S, Biancaniello F, Mehrabian R. 1985. Characterization of the precipitation-hardened aluminium alloy 2024 subjected to a series of pre-aging heat treatments prior to various tempering treatments using eddy current and hardness measurements. *Materials Science and Engineering*. p. 1-10.
- [17].Wolf Stanley, Smith Richard F. 1992. *Guía para mediciones electrónicas y prácticas de laboratorio*. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. México. Segunda Edición.
- [18].ASTM-B193. 2002. Standard test method for resistivity of electrical conductor metals. Philadelphia.
- [19].González C, Pereira D. Junio 2006. *Curso de Extensión Profesional CORRIENTES INDUCIDAS 1 y 2 conforme a requisitos de la Norma COVENIN 1999*. Caracas.
- [20].Khan S.H, Ali F, Nusair K. A, Iqbal M.A. 2008. Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reduction.
- [21].ASTM-E1004. 2002. Standard Practice for determining electrical conductivity using the electromagnetic (Eddy-current) method. Philadelphia.
- [22].Gur H, Yildiz I. 2004. *Materials Science and Engineering A-382*. p. 395–400.
- [23].González C, Faraudita F y Gallipoli A. 2004. *Conductividad Macroscópica y Superficial en la Recristalización de Aluminio 3003 H14*. FIUCV (JIFI). Caracas.
- [24].Al-Marahleh G. Mayo 2006. Effect of heat treatment on the distribution and volume of Mg₂Si in structural aluminum alloy 6063. *Journal of Metal Science and Heat Treatment*. Vol.48 N° 5-6, p.205-209.
- [25].Kolachev B. A, Gabidullin R. M. 1983. *Tecnología de Tratamiento Térmico de Metales y Aleaciones no Férricas*. Editorial MIR Moscú.
- [26].ASM Metals Handbook. 1991. *Heat Treating*. Volumen 4.

- [27].Molera S. 1991. Tratamientos térmicos de los metales. Marcombo, S.A.
- [28].ASTM 370-03a. 2003. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. Philadelphia.
- [29].Higgins R. A. 1993. Metallurgy Applied Physical Metallurgy. Volumen 1. Sixth Edition. Hodder Headline Group.
- [30].ASTM E3-01. 2001. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. Philadelphia.
- [31].ASM Metals Handbook. 2004. Metallography and Microstructures. Volumen 9.
- [32].NIST (National Institute of Standards and Technology). 1994. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of Measurement Results.
- [33].Guía de Servicio. 1992. Hewlett Packard. Tercera Edición.

APÉNDICE DE TABLAS

APENDICE A (Ensayo de Tracción):

Tabla A.1. Valores registrados de los ensayos de tracción (Probeta 1)

Deformación (%)	Esfuerzo(Mpa)
0	0
1,042176871	16,5839399
2,084353741	33,1678798
3,126530612	48,7153234
4,168707483	69,9634964
5,210884354	90,1751732
6,253061224	106,240865
7,295238095	114,532835
8,337414966	118,160572
9,379591837	122,306557
10,42176871	127,489038
11,46394558	134,226264
12,50612245	140,963489
13,54829932	145,627722
14,59047619	147,700715
15,63265306	149,255459
16,67482993	150,810203
17,7170068	152,364948
18,75918367	153,919692
19,80136054	155,992685
20,84353741	157,547429
21,88571429	157,547429
22,92789116	158,065677
23,44897959	Max. 158,583925
23,97006803	158,065677
25,0122449	158,065677
26,05442177	155,992685
27,09659864	152,364948
28,13877551	146,14597
29,18095238	138,890497
30,22312925	127,489038
30,64	Rup. 125,416045

Tabla A.2. Valores registrados de los ensayos de tracción (Probeta 2)

Deformación (%)	Esfuerzo (Mpa)
0	0
1,098611111	17,618441
2,197222222	34,2005032
3,295833333	53,8917019
4,394444444	80,8375529
5,493055556	100,528752
6,591666667	107,783404
7,690277778	114,001677
8,788888889	119,183572
9,8875	128,510982
10,98611111	137,838391
12,08472222	141,983907
13,18333333	145,093044
14,28194444	148,20218
15,38055556	151,311317
16,47916667	153,384075
17,57777778	155,456833
18,67638889	157,52959
19,775	158,565969
20,87361111	159,602348
21,97222222	160,638727
23,07083333	161,675106
24,16944444	161,675106
25,26805556	162,193295
26,36666667	Max. 162,711485
27,46527778	162,193295
28,56388889	159,602348
29,6625	153,384075
30,76111111	144,056665
31,64	Rup. 132,656497

Tabla A.3.Ensayo de tracción (Probeta 3)

Deformación (%)	Esfuerzo(N/mm ²)
0	0
1,078321678	16,8667439
2,156643357	32,6793164
3,234965035	53,7627463
4,313286713	78,0086908
5,391608392	100,146292
6,46993007	107,525493
7,548251748	112,79635
8,626573427	120,175551
9,704895105	128,608923
10,78321678	137,042295
11,86153846	143,367324
12,93986014	146,529838
14,01818182	149,692353
15,0965035	152,854867
16,17482517	155,490296
17,25314685	157,598639
18,33146853	159,706982
19,40979021	160,761153
20,48811189	162,34241
21,56643357	162,869496
22,64475524	162,869496
23,72307692	163,396582
24,8013986	Max. 163,396582
25,87972028	162,869496
26,95804196	160,234067
28,03636364	154,96321
29,11468531	145,475667
30,19300699	133,87978
30,84	Rup. 129,663094

Tabla A.4.Ensayo de tracción (Probeta 4)

Deformación (%)	Esfuerzo (N/mm ²)
0	0
1,25688889	20,61811335
2,51377778	35,05079269
3,77066667	60,82343438
5,02755556	85,56517039
6,28444444	97,9360384
7,54133333	108,2450951
8,79822222	118,5541517
10,0551111	127,8323028
11,312	134,0177368
12,5688889	140,2031708
13,8257778	144,3267934
15,0826667	149,4813218
16,3395556	152,5740388
17,5964444	154,6358501
18,8533333	156,6976614
20,1102222	158,7594728
21,3671111	159,7903784
22,624	Max. 160,8212841
23,8808889	159,7903784
25,1377778	154,6358501
26,3946667	144,3267934
27,6515556	131,9559254
28,28	Rup. 128,8632084

Tabla A.5. Valores de Área inicial, y longitud inicial y final de los ensayos de tracción.

Probeta	Área de sección transversal (mm ²)	Longitud inicial (mm)	Longitud final (mm)
1	96,06574502	50,00	55,82
2	95,78524417	50,00	55,32
3	94,76330418	50,00	55,42
4	96,28078824	50,00	54,14

APENDICE B (Método de las 4 puntas-Dirección longitudinal):

Tabla B.1. Valores de Voltaje y Corriente del material original.

I(A)	V(mV)
2,00072	0,0091
2,00066	0,009
2,00073	0,009
2,00072	0,0089
2,00061	0,0089
2,00066	0,0092
2,00069	0,0091
2,00075	0,0091
2,00076	0,009
2,0007	0,0092
2,00068	0,009
2,00071	0,0091
2,00069917	0,00905

Tabla B.2. Valores de Voltaje y Corriente del material solubilizado.

I(A)	V(mV)
2,00059	0,0097
2,00032	0,0098
2,00042	0,0099
2,00092	0,0101
2,001	0,0101
2,00116	0,0099
2,00032	0,0094
2,00069	0,0095
2,00048	0,0092
2,00048	0,009
2,00067	0,0092
2,00079	0,0091
2,00065333	0,009575

Tabla B.3. Valores de Voltaje y Corriente de la Probeta 1.

I(A)	V(mV)
2,00036	0,0155
2,00039	0,0156
2,00034	0,0154
2,00048	0,0154
2,0004	0,0154
2,00062	0,0153
2,00044	0,0155
2,00035	0,0155
2,00027	0,015
2,00034	0,0154
2,00066	0,0154
2,00042	0,0154
2,0004225	0,0154

Tabla B.4. Valores de Voltaje y Corriente de la Probeta 2.

I(A)	V(mV)
2,00032	0,0159
2,00072	0,016
2,00061	0,016
2,00081	0,0157
2,00057	0,016
2,00031	0,0159
2,00073	0,0157
2,00076	0,0161
2,00053	0,0159
2,00085	0,0159
2,00051	0,0158
2,00025	0,0158
2,00058083	0,01589167

Tabla B.5. Valores de Voltaje y Corriente de la Probeta 3.

I(A)	V(mV)
2,00025	0,0147
2,00046	0,015
2,00076	0,0146
2,00059	0,0148
2,00058	0,0145
2,00032	0,0147
2,00086	0,0152
2,00072	0,0148
2,00043	0,0146
2,0006	0,0147
2,00025	0,0147
2,00045	0,015
2,0005225	0,014775

Tabla B.1.1. Valores de área promedio del material original y solubilizado.

	Probeta 6063T6		Probeta 6063	
	Espesor(mm)	Ancho(mm)	Espesor(mm)	Ancho(mm)
	9,675	74,64	9,714	73,84
	9,685	74,66	9,692	73,86
	9,682	74,7	9,684	73,88
	9,683	74,66	9,69	73,86
	9,7	74,68	9,659	73,84
	9,665	74,66	9,656	73,8
	9,669	74,66	9,661	73,82
	9,666	74,66	9,661	73,82
	9,662	74,68	9,666	73,8
	9,663	74,64	9,665	73,82
Promedio	9,675	74,664	9,6748	73,834
Área	722,4 ± 0,5		714,3 ± 0,5	

Tabla B.1.2. Valores de área promedio de las Probetas 1, 2 y 3.

	Probeta 3		Probeta 1		Probeta 2	
	Espesor(mm)	Ancho(mm)	Espesor(mm)	Ancho(mm)	Espesor(mm)	Ancho(mm)
	9,43	49,52	9,211	49,12	9,046	48,76
	9,43	49,56	9,172	49,02	9,048	48,6
	9,444	49,5	9,185	48,96	9,081	48,56
	9,435	49,54	9,267	49,08	9,043	48,68
	9,408	49,5	9,164	49,12	9,033	48,62
	9,397	49,52	9,149	49,06	9,026	48,5
	9,41	49,5	9,184	48,94	9,045	48,6
	9,42	49,5	9,165	49,08	9,02	48,68
	9,404	49,5	9,134	49	9,04	48,68
	9,401	49,44	9,201	49,06	9,079	48,52
Promedio	9,4179	49,508	9,1832	49,044	9,0461	48,62
Área	466,3 ± 0,5		450,4 ± 0,5		439,8 ± 0,5	

APENDICE C (Método de las 4 puntas-Dirección transversal):

Tabla C.1. Material original.

I(A)	V(mV)
2,00067	0,0144
2,00046	0,0144
2,00014	0,0145
2,00063	0,0146
2,00057	0,0147
2,00028	0,0146
2,00031	0,0144
2,00053	0,0146
2,00016	0,0145
2,00037	0,0145
2,00035	0,0144
2,00044	0,0145
2,00064	0,0144
2,00055	0,0146
2,00043571	0,014507143

Tabla C.2. Material Solubilizado.

I(A)	V(mV)
2,00095	0,0142
2,00088	0,0148
2,00024	0,0157
2,00015	0,0152
2,00052	0,0145
2,00069	0,0148
2,0006	0,0152
2,00041	0,0151
2,0003	0,0148
2,00021	0,015
2,00006	0,015
2,00042	0,0152
2,00025	0,015
2,00018	0,0148
2,00041857	0,01495

Tabla C.3. Muestra 1.

I(A)	V(mV)
2,0057	0,0134
2,0057	0,0133
2,00561	0,0132
2,00542	0,0131
2,00531	0,0132
2,00483	0,0133
2,00467	0,0132
2,00408	0,0133
2,00375	0,0132
2,00364	0,0132
2,00348	0,0132
2,00321	0,0133
2,0032	0,0132
2,00299	0,0133
2,00439929	0,013242857

Tabla C.5. Muestra 2.

I(A)	V(mV)
2,00231	0,0128
2,00185	0,0128
2,00172	0,0128
2,00168	0,0127
2,0014	0,0128
2,00147	0,013
2,00159	0,0129
2,00157	0,0129
2,00138	0,0129
2,00125	0,0128
2,00127	0,013
2,00118	0,0129
2,00114	0,0128
2,00103	0,0127
2,00148857	0,012842857

Tabla C.4. Muestra 3.

I(A)	V(mV)
2,00402	0,014
2,00271	0,0137
2,00385	0,0139
2,0039	0,014
2,00384	0,0138
2,00332	0,0137
2,00291	0,0137
2,0029	0,0136
2,00293	0,0136
2,00277	0,0136
2,00278	0,0138
2,00251	0,0137
2,0025	0,0137
2,00251	0,0137
2,00310357	0,01375

Tabla C.1.1. Valores de área promedio del material original y solubilizado.

Prob.6063T6		Prob.6063	
Ancho(mm)	Espesor(mm)	Ancho(mm)	Espesor(mm)
9,788	9,526	9,954	9,515
9,793	9,585	10,004	9,542
9,721	9,605	10,017	9,532
9,809	9,608	10,012	9,492
9,754	9,582	9,959	9,41
9,794	9,586	9,966	9,442
9,813	9,591	10,008	9,497
9,794	9,541	10,015	9,54
9,641	9,604	9,984	9,552
9,766	9,573	9,945	9,528
Promedio	9,7673	9,5801	9,9864
Area	93,6 ± 0,3		94,9 ± 0,3

Tabla C.1.2. Valores de área promedio de las muestras de las probetas 1, 2 y 3.

Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
Ancho(mm)	Espesor(mm)	Ancho(mm)	Espesor(mm)	Ancho(mm)	Espesor(mm)
12,164	8,939	11,689	8,914	11,983	9,259
12,174	9,001	11,796	8,93	12,012	9,263
12,173	9,037	11,885	8,922	12,045	9,276
12,162	9,048	11,962	8,906	11,999	9,261
12,121	9,038	11,99	8,871	11,975	9,271
12,091	8,958	11,993	8,928	12,064	9,264
12,129	8,844	11,936	8,937	12,081	9,292
12,134	8,883	11,861	8,932	12,087	9,262
12,125	8,91	11,76	8,918	12,084	9,291
12,129	8,947	11,696	8,892	12,055	9,295
Promedio	12,1402	8,9605	11,8568	8,915	12,0385
Area	108,8 ± 0,3		105,7 ± 0,3	111,6 ± 0,3	

APENDICES D y E (Método de Corrientes Inducidas):

Tabla D. Número de divisiones para las probetas sin TT.

	Prob.6063	Probeta1	Probeta2	Probeta3
N° de Divisiones	6,5	6,25	7	6
	6	6,5	6,75	6,5
	6,3333	6,75	6,75	6,25
	6	6,5	7	6,5
	6	6,25	6,5	6,5
	5,75	6,75	7,25	6,25
	6,25	6	6,75	6
	5,5	6,25	7	6,25
	6	6,6666	6,75	6,5
	5,75	7	7	6,25
	6,25	6,5	6,75	6
	5,75	6,75	6,5	6,5
34dB	6,00694167	6,51388333	6,83333333	6,29166667
40dB	12,01	13,03	13,67	12,58

Tabla E.1. Número de divisiones para la probeta 1 con TT.

Probeta 1	1/2h	1h	3h
N° de divisiones	4,5	3,5	4,75
	4	3,75	4,5
	4,5	3,5	4,5
	4,75	3	4,75
	4	3,5	4,25
	4,25	3	4,25
	4,75	3	4,25
	4,5	3,25	4,5
	4,75	3,25	4,5
	4	3	4,5
	4,25	3,25	4,5
	4,5	3	4,5
	4	3,5	4
	4,5	3,25	4,75
	4,25	3,5	4,75
34dB			4,48333333
40dB	4,37	3,28	8,97

Tabla E.2. Número de divisiones para la probeta 2 con TT.

Probeta 2	1/2h	1h	3h
N° de divisiones	2,75	5	5
	3	5	5,25
	3	4,75	5
	3	4,75	5
	3,25	4,5	5,25
	3,5	4,75	5
	3,25	5,25	5,25
	2,75	5,5	5,5
	3,25	5	5,5
	2,75	5	5,25
	3	5,25	5,25
	3,25	4,75	5,5
	2,75	5,25	5,25
	3	5	5,25
2,75	5	5,5	
34dB			5,25
40dB	3,02	4,98	10,5

Tabla E.3. Número de divisiones para la probeta 3 con TT.

Probeta 3	1/2h	1h	3h
N° de divisiones	0	5	4,75
	0,25	5,25	5
	-0,25	4,75	5
	0,25	5	5
	-0,25	5,25	5
	0,25	5,25	4,75
	0	5,25	5
	-0,25	5	5
	-0,25	5	4,75
	-0,25	5,25	4,75
	0,25	5	4,75
	0	4,75	5
	0,25	5,25	5
	0	5	5
0,25	5,5	4,75	
34dB			4,9
40dB	0,02	5,1	9,8

APENDICE F (Ensayo de dureza).

Tabla F.1. Mediciones de dureza para todas las probetas sin TT.

Probeta	6063T6	6063	1	2	3
Mediciones De dureza	61,3	43,8	53,6	55	50,6
	59,3	42,3	50,5	54,1	49,8
	60,8	44	54,6	54,4	48,4
	60,4	44,1	51,8	56,7	45,4
	60,4	44,2	50,8	56,6	49,6
Promedio	60,44	43,68	52,26	55,36	48,76

Tabla F.1.1. Mediciones de dureza de la Probeta 1 con TT.

Tiempo	0h	1/2h	1h	3h
Mediciones De dureza	53,6	35,8	34,8	31
	50,5	38,1	34,9	31,8
	54,6	35,9	34,6	31,7
	51,8	37	34,8	31
	50,8	36,8	34,9	31,1
Promedio	52,26	36,72	34,8	31,32

Tabla F.1.2. Mediciones de dureza de la Probeta 2 con TT.

Tiempo	0h	1/2h	1h	3h
Mediciones De dureza	55	36,7	35,5	31,1
	54,1	38,4	34,7	30,7
	54,4	37,2	36,4	29,3
	56,7	37,5	35,4	29,5
	56,6	37,3	34,4	30,5
Promedio	55,36	37,42	35,28	30,22

Tabla F.1.3. Mediciones de dureza de la Probeta 3 con TT.

Tiempo	0h	1/2h	1h	3h
Mediciones De dureza	50,6	34,1	34,5	30,4
	49,8	35,4	34,9	29,4
	48,4	35,1	34	29,4
	45,4	35,7	34,2	31,1
	49,6	35,5	34,2	30,6
Promedio	48,76	35,16	34,36	30,18