

	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15	
			VERSIÓN	02	
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN			FECHA	03/04/2017
				PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ	APROBÓ		
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad		

RESUMEN

TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): JULIO DANIEL APELLIDOS: POLO CANTILLO

NOMBRE(S): GABRIEL APELLIDOS: FIGEROA DIAZ

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): ISMAEL HUMBERTO APELLIDOS: GARCIA PAEZ

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): INCIDENCIA DE LOS TRATAMIENTOS
TÉRMICOS CRIOGENICOS EN LA DUREZA Y CONDUCTIVIDAD DEL
ALUMINIO 1350-H 19

El proyecto consiste en la aplicación de un tratamiento térmico criogénico a alambres de aluminio de referencia 1350-H19 componentes de cables concéntricos encauchetados para conducción de electricidad. Al material se realizó el análisis metalográfico, la medición de dureza vickers y de conductividad eléctrica antes y después del tratamiento criogénico, con el fin de determinar los cambios en la dureza, en la conductividad eléctrica y en la microestructura, debidos a la aplicación del tratamiento térmico criogénico. Los resultados mostraron que el tratamiento criogénico no conlleva a cambios sustanciales en estas propiedades y por tanto no se considera viable para su implementación en este material.

PALABRAS CLAVES: Tratamiento Criogénico, Dureza Vickers, Aluminio 1350, conductividad eléctrica.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 78 PLANOS: ILUSTRACIONES: 17 CD ROOM:

INCIDENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS CRIOGÉNICOS EN LA
DUREZA Y CONDUCTIVIDAD DEL ALUMINIO 1350-H19.

JULIO DANIEL POLO

GABRIEL FIGUEROA DÍAZ

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

CÚCUTA, 2021

INCIDENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS CRIOGÉNICOS EN LA
DUREZA Y CONDUCTIVIDAD DEL ALUMINIO 1350-H19.

PROYECTO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO.

JULIO DANIEL POLO

GABRIEL FIGUEROA DÍAZ

DIRECTOR

ISMAEL HUMBERTO GARCÍA PÁEZ

INGENIERO MECÁNICO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

CÚCUTA, 2021



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

FECHA: CÚCUTA, 27 DE SEPTIEMBRE 2021
HORA: 10:00 a.m.
LUGAR: PLATAFORMA VIRTUAL GOOGLE MEET
PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA MECÁNICA

TÍTULO: "INCIDENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS CRIOGÉNICOS EN LA DUREZA Y CONDUCTIVIDAD DEL ALUMINIO 1350-H19."

Jurados: ING. PEDRO PABLO TORRES MEDINA
ING. GERMAN ADOLFO JABBA CASTAÑEDA

Director: ING. ISMAEL HUMBERTO GARCÍA PAEZ

Nombre del estudiante	Código	Calificación	
		Letra	Número
JULIO DANIEL POLO CANTILLO	1120870	Cuatro, Cuatro	4.4
GABRIEL FIGUEROA DIAZ	1120850	Cuatro, Cuatro	4.4

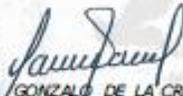
APROBADA



ING. PEDRO PABLO TORRES MEDINA



ING. GERMAN ADOLFO JABBA CASTAÑEDA



Vo.Bo /GONZALO DE LA CRUZ ROMERO GARCÍA
Coordinador Comité Curricular
Ingeniería Mecánica

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedicamos principalmente a Dios, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados ser profesionales de la ingeniería. A nuestros padres, por su amor y ayuda continua en todos estos años, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos.

A nuestros hermanas (os) y amigos(as) por estar siempre presentes, acompañándonos y por el apoyo que nos brindaron a lo largo de esta etapa de nuestras vidas. A todas las personas que de una u otra manera nos han apoyado y han hecho posible que este trabajo se realice con éxito, en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos sin esperar nunca nada a cambio, a todos ellos dedicamos este trabajo, porque lograron que este sueño se haga realidad.

AGRADECIMIENTO

Agradecimientos a la Universidad Francisco de Paula Santander, a toda la Facultad de Ingeniería, a directivos, docentes, administrativos, a nuestro director de proyecto y a cada una de las personas quienes con su apoyo y la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pudiéramos realizar este trabajo y crecer cada día mas como profesionales.

Tabla de contenido

Introducción	12
Generalidades	14
1.1. Título	14
1.2. Planteamiento del problema	14
1.3. Formulación del problema	19
1.4. Justificación	19
1.4.1. Perspectiva	22
1.5. Objetivos	24
1.5.1. Objetivo general	24
1.5.2. Objetivos específicos	25
1.6. Alcances y limitaciones	25
1.6.1. Alcances	25
1.7. Delimitaciones	26
2. Marco referencial	26
2.1. Antecedentes	27
2.2. Marco teórico	29
2.2.1. Tratamientos térmicos	29
2.2.2 Efecto de los tratamientos térmicos en el aluminio	32
2.2.3 Tratamiento Térmico Criogénico	34

2.2.4 conductividad eléctrica	39
2.3 Marco conceptual	43
2.4. Marco legal	46
3. Diseño metodológico	48
3.1. Tipo de proyecto	48
3.3. Fases del proyecto	49
4. procedimiento experimental	49
5. Prueba metalográfica	50
5.1. Corte de muestras	51
5.2. Montaje y Empestillado de muestras y probetas metalográficas	52
5.3. Desbaste, Lijado y Pulido - Ataque Químico	52
6. Tratamiento térmico criogénico al aluminio 1350 H-19	53
7. Micrografías	55
5.0. Prueba de dureza	60
6.0. Prueba conductividad eléctrica	65
7. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES	69
RECOMENDACIONES	71
ANEXOS	72
Bibliografía	74

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama Aluminio Silicio	33
Figura 2. Método basado en la ley de ohm	40
Figura 3. Probeta y magnitudes del parámetro geométrico	41
Figura 4. Método directo	42
Figura 5. Materia prima	50
Figura 6. Disco de corte Fino T41 9 X 5/64 X 7/8 Dewalt Dw80671a	51
Figura 7. Muestras cortadas	52
Figura 8. Termo YDS 2-35	54
Figura 9. Microscopio Leica DM LM	56
Figura 10. Zeiss Axio Scope A1	56
Figura 11. Durómetro	61
Figura 12. Huella y medición de las diagonales	62
Figura 13. Ubicación de las huellas en la muestra	62
Figura 14. Diagrama de la variación de la dureza	64
Figura 15. Representación esquemática de ensayo de conductividad	67
Figura 16. Multímetro digital	67

Lista de tablas

Tabla 1. Características de las series del aluminio	35
Tabla 2. Sistemas básicos de normalización	36
Tabla 3. Tipos de temple para el aluminio	37
Tabla 4. Composición química del aluminio	38
Tabla 5. Ataque químico	53
Tabla 6. Intervalos de tiempo	55
Tabla 7. Distribución de muestras por tiempo	55
Tabla 8. Cuadro comparativo de las muestras a diferentes tiempos de criogenia	57
Tabla 9. Valores obtenidos de dureza vickers	63
Tabla 10. Análisis estadístico de la dureza	63
Tabla 11. ensayo de conductividad	68

Lista de anexos

Anexo 1.Tabla de dureza vickers en muestras de cable ACC de aluminio 1350 H-19	72
Anexo 2.Especificaciones técnicas de la materia prima (General Cable, 2015)	73

Introducción

En el mundo de la ingeniería, el estudio de la ciencia de los materiales es sin duda uno de los más importantes; en especial cuando se trata de mejorar, optimizar y buscar nuevas formas de utilización, que incrementen la gama de aplicaciones a determinado material. Debido a esto, uno de los campos más estudiados es el de los tratamientos térmicos, a causa de su gran utilidad y capacidad de modificar los metales de manera total o parcial, otorgándole a los metales diferentes propiedades, con el fin de cumplir con los requerimientos que exige la industria en cuanto a utilidad y vida útil y, ofreciendo una amplia gama de aplicaciones en la construcción de todo tipo de piezas mecánicas.

Los tratamientos térmicos convencionales que se realizan en su mayoría a los aceros como el templado, revenido, normalizado y recocido, Consisten en calentar y enfriar el material, primero sometándolo a una determinada temperatura, cuya magnitud dependerá del tipo de tratamiento térmico, y del enfriamiento que se produce al sumergir o someter la pieza a un gas o un líquido; para de esta manera modificar la microestructura del material y por tanto sus propiedades; el enfriamiento también varía dependiendo del tipo de tratamiento térmico que se esté empleando, ya que esto influye en gran manera sobre los resultados que se desean obtener.

Los tratamientos térmicos criogénicos llevan poco tiempo de estudio en comparación con los demás tratamientos convencionales, y gracias a diferentes investigaciones como las de influencia de los tratamientos térmicos criogénicos en la dureza y resistencia al desgaste en aceros hss (jaguar hss 3/8x3") de (Posso & Giraldo, 2017) e influencia del tratamiento térmico de homogenizado y renevejecido seguido de un tratamiento criogénico en la microestructura y la

dureza del aluminio 2024-t4 de (Vargas Lozano & Sierra Gonzales, 2016), se ha demostrado que el uso de las bajas temperaturas puede mejorar las propiedades de diferentes materiales; la diferencia radica en que mientras la mayoría de tratamientos someten el material a una temperatura elevada y estos se realizan en su mayoría a aceros, los tratamientos térmicos criogénicos someten el material a una temperatura muy por debajo de los cero grados Celsius, y en este caso de estudio a un metal básico como lo es el aluminio 1350-H19, con el fin de modificar sus propiedades y dar le diferentes aplicaciones, en especial en la parte eléctrica.

En la actualidad existen dos tipos de tratamientos criogénicos, los convencionales y los multi-etapas. Los tratamientos térmicos criogénicos modifican el material y "producen cambios de mejora en parámetros como la resistencia al desgaste, la vida a fatiga, la tenacidad, la conductividad..." (Elhuyar, 2014), lo que ocasiona que aumente la vida útil de las piezas y por tanto se vea reflejado en un beneficio económico para el proceso de producción o la empresa.

En el presente proyecto por tanto, se realizó un tratamiento criogénico a muestras de aluminio 1350 H-19, específicamente muestras de Cables concéntricos de aluminio 1350 H-19, AAC, con cubierta con XLPE, con el propósito de determinar la influencia de dicho tratamiento en dos propiedades del material la dureza y la conductividad. Para ello se realizó el corte y pulido de las muestras y posteriormente el análisis metalográfico, prueba de dureza y medición de la conductividad antes y después del tratamiento térmico criogénico, de esta manera analizando los resultados en las mediciones se determinó la influencia del tratamiento térmico criogénico en la dureza conductividad de este tipo de aluminio.

Generalidades

1.1. Título

INCIDENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS CRIOGÉNICOS EN LA DUREZA Y CONDUCTIVIDAD DEL ALUMINIO 1350-H19.

1.2. Planteamiento del problema

La gran exigencia de la industria a nivel nacional y mundial ocasiona que cada día se busque mejorar y encontrar formas de hacer más eficientes los materiales que en ella se utilizan, es en este sentido que el uso de los tratamientos térmicos abarcan siempre un espacio importante en la parte industrial, por lo cual la investigación, experimentación y continuo avance en el área de los tratamientos térmicos, juega un papel esencial en la evolución de la industria. De esta necesidad surge el desarrollo de este proyecto con el fin de encontrar y aportar nuevos conocimientos en un campo poco explorado como lo son los tratamientos térmicos criogénicos, y al final estos conocimientos puedan ser de utilidad en el ámbito de la investigación y la industria.

La automoción, la industria aeroespacial, la metalmecánica, la minería y la industria en general, buscan permanentemente herramientas y utillajes más fiables y duraderos. Pero para sacar el máximo partido de los aceros de herramientas es preciso aplicar los tratamientos térmicos adecuados. No obstante, la escasa evolución en este campo contrasta

con los avances producidos en el de los aceros durante los últimos años. Es decir, a pesar de que el tratamiento criogénico ha mostrado un incuestionable potencial para mejorar el rendimiento de una amplia variedad de materiales y aplicaciones, su aplicación en la industria es aún anecdótica. (Elhuyar, 2014)

La mayoría de tratamientos térmicos convencionales son utilizados para mejorar las propiedades del acero, utilizado en la fabricación de piezas y herramientas, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas; por esta razón son muy utilizados en la industria y han tenido un gran crecimiento en comparación con los tratamientos térmicos criogénicos. Estos tratamientos son una serie de operaciones de calentamiento y enfriamiento bajo condiciones controladas en temperatura, presión, velocidad y tiempo de permanencia a las cuales el material va a estar expuesto, que en resumen es el proceso que se realiza en los tratamientos térmicos convencionales más usados, como los son el normalizado, revenido, temple y recocido; de esta manera la definición y el proceso del tratamiento térmico criogénico y los tratamientos convencionales son similares pero la diferencia radica, en que en lugar de someter el material a una temperatura elevada, se expondrá a temperaturas muy por debajo de los cero grados Celsius. En consecuencia la evolución de los tratamientos térmicos criogénicos no solo es escasa, lo es a un más en su aplicación a otros materiales distintos al acero, como lo son otros metales importantes y de gran demanda en la industria, como el aluminio.

La utilización de tratamientos térmicos permite lograr las más diversas características del acero y sus aleaciones, así como de otros muchos metales. En consecuencia dichos tratamientos tienen una importancia primordial en las distintas fases de fabricación de la industria moderna. (cimiano, 2002)

En la mayoría de ocasiones se debe garantizar que los materiales y piezas cumplan con los requerimientos que se les exigen, por esta razón deben poseer ciertas propiedades que los hacen idóneos para dicha aplicación en la que van hacer empleados y de este modo puedan cumplir satisfactoriamente su función.

Uno de los elementos más abundantes en el planeta es el aluminio y además uno de los más usados debido a sus buenas propiedades como los son buena resistencia a la corrosión, resistencia a la fatiga, su dureza y la conductividad eléctrica, Sus aplicaciones más destacadas se dan en la industria automovilística, fabricación de equipos electrónicos, la aeronáutica y espacial, donde es muy empleado.

La resistencia a la tracción del aluminio puro es limitada pero al mezclarlo con otros elementos el aluminio se convierte en un metal muy fuerte. Algunas aleaciones también lo pueden fortalecer y endurecer mediante tratamiento térmico, lo que aumenta su resistencia a la tracción de forma espectacular. En la actualidad se está utilizando el aluminio duro AAC (All Aluminium Conductor o conductor de aluminio); en CFE (Comisión Federal de Electricidad, de Mexico) se utiliza mayoritariamente el aluminio reforzado con acero, el ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced, conductor de aluminio con refuerzo de acero) es el más barato y tiene muy buenas propiedades eléctricas y mecánicas. Se usa el aluminio, sobre todo para instalaciones de media y alta tensión (comercios grandes, industria mediana, postes de luz). “En baja tensión se utiliza preferentemente cobre, porque tiene muy buenas propiedades, contra el aluminio que, a esta magnitud, si resulta más caro debido a que presenta más pérdidas eléctricas. (de la osada, 2017)

La aleación de aluminio serie 1000 tiene buen rendimiento en conductividad eléctrica y conductividad térmica. En comparación con los aluminios serie 2000 y 700, el

aluminio serie 1000 tiene menos resistencia de metal, aplicado principalmente como materiales conductores, materiales de intercambio de calor, materiales decorativos, utilizándose en equipos químicos, artículos para el hogar, productos eléctricos etc, la aleación de aluminio 1350 se aplica para la fabricación de alambres, hilos conductores, barras colectoras, tiras de transformadores. (Qinghai guoxin aluminum industry incorporated co.ltd, 2019)

Sin embargo al fabricar una pieza o algún dispositivo electrónico lo que se busca es que este tenga el mejor desempeño y durabilidad, al menor costo posible, en este tipo de aplicaciones dos de los factores críticos que se presentan son, el sobrecalentamiento y la fatiga, el primero muy común en la parte eléctrica donde el material soporta el paso de la corriente eléctrica, lo cual implica un aumento considerable del calor en dicho material, debido en gran parte a la resistencia del material el paso de la electricidad, ocasionando por ende un desgaste o deterioro del material, además de pérdidas económicas debido a la energía que se pierde o se disipa principalmente en forma de calor; produciendo al final la falla o daño según la función que desempeñe dicho elemento. esto se da principalmente en dispositivos electrónicos y sistemas eléctricos o en aplicaciones donde el material está sometido a temperaturas bastante elevadas como es el caso de conectores eléctricos o pequeñas partes que están en contacto con otros dispositivos diseñados para generar calor como las resistencias eléctricas; en este sentido una de las aplicaciones más representativas del aluminio es en la fabricación de alambres de aluminio 1350 H19, cableados concéntricamente alrededor de un núcleo de acero recubierto de zinc clase A, utilizados en la transmisión de electricidad en redes eléctricas. El segundo factor, la fatiga, ésta se presenta en otras aplicaciones más alejadas de la parte eléctrica como es la construcción de algunas piezas para automóviles,

aviones y el área naval donde el material está sometido a esfuerzos constantes de flexión y compresión, que conllevan a que este falle por fatiga. (de la osada, 2017)

En consecuencia a lo anterior la hipótesis planteada es que al aplicar un tratamiento térmico criogénico al aluminio 1350-H19, se pueden obtener buenas mejoras en dos propiedades fundamentales, la dureza y conductividad, debido a las modificaciones que se generan en la microestructura del material al aplicar este tratamiento.

El tratamiento criogénico es un proceso térmico en el que el material es sometido a temperaturas criogénicas, inferiores a -153 Celsius. El tratamiento criogénico convencional consiste en enfriar lentamente el material hasta llegar a unos -180 °C, mantenerlo a esa temperatura durante un periodo prolongado de tiempo y volver a calentarlo hasta la temperatura ambiente. El tratamiento criogénico afecta a todo el material, no es superficial. En general, "produce cambios de mejora en parámetros como la resistencia al desgaste, la vida a fatiga, la tenacidad, la conductividad..." Por otra parte, son perfectamente compatibles con la mayor parte de los recubrimientos de la industria. (Elhuyar, 2014)

Según los argumentos dados anteriormente, no solo se busca realizar un aporte al área investigativa de los tratamientos térmicos e incursionar en los tratamientos térmicos criogénicos, que poco se implementa en materiales distintos al acero, el principal problema a resolver es poder otorgarle al aluminio una mejora en cuanto a sus propiedades que permitan aumentar el número de aplicaciones principalmente en la parte eléctrica otorgándole al aluminio otra funcionalidad; es por esto que se elige en nuestro caso de estudio la aleación de aluminio 1350-H19. en este sentido se pueden mejorar las propiedades en cuanto a dureza y conducción eléctrica y térmica, a los niveles necesarios para su implementación en instalaciones eléctricas no solo en alta y media tensión, también en baja tensión donde es poco

utilizado y donde es reemplazado por el cobre, además, de implementarlo, aumentar su eficiencia y durabilidad, en su utilización bajo temperaturas bastante elevadas que necesiten una buena transferencia de calor.

1.3. Formulación del problema

¿Cómo inciden los tratamientos térmicos criogénicos en la dureza y conductividad del aluminio 1350-H19?

1.4. Justificación

El creciente desarrollo de la industria, exige que continuamente se busquen nuevas formas de desarrollar tecnologías y materiales que respondan a las necesidades de la misma, la industria automovilística, la industria aeroespacial, la metal mecánica, la minería y la industria en general, continuamente desarrollan investigaciones enfocadas en este sentido y destinan grandes recursos a desarrollar nuevos materiales y nuevas formas de mejorar, optimizar y hacer más eficientes los materiales que usan, y es en este campo que los metales como el acero, aluminio, cobre y algunas aleaciones como el bronce siempre están en primer lugar.

En lo referente a los tratamientos térmicos son muchos los avances que se han desarrollado en el campo de los tratamientos térmicos convencionales sin embargo todos estas investigaciones son enfocadas en los tratamientos térmicos más conocidos como lo son el revenido, temple, recocido y normalizado, y en particular a un material de gran demanda y uso en la industria como lo es el acero; estos tratamientos consisten en calentar y enfriar el material, primero sometiénolo a una determinada temperatura, cuya magnitud dependerá del tipo de

tratamiento térmico, y el enfriamiento que se produce al sumergir o someter la pieza a un gas o un líquido; para de esta manera modificar la microestructura del material y por tanto sus propiedades; el enfriamiento también varía dependiendo del tipo de tratamiento térmico que se esté empleando, ya que esto influye en gran manera sobre los resultados que se desean obtener. Pero en realidad poco se pensaba o se consideraba que las bajas temperaturas podrían provocar cambios benéficos en la estructura y en consecuencia en las propiedades de los materiales, por esta razón este campo ha sido poco explorado y muchos de los estudios e investigaciones que se han hecho en su mayoría van enfocados al acero.

Por estos argumentos y por las anotaciones hechas anteriormente cualquier investigación hecha a materiales que no sean aceros como por ejemplo los metales de transición, metales básicos y aleaciones son de particular interés para el desarrollo de la industria y nuevas tecnologías, debido a su capacidad para conducir energía eléctrica, es por esta singular propiedad que puede resultar muy provechoso la aplicación de los tratamientos térmicos criogénicos a este tipo de materiales, debido a que estos tratamientos "produce cambios de mejora en parámetros como la resistencia al desgaste, la vida a fatiga, la tenacidad, la conductividad...". (Posso & Giraldo, 2017, pág. 11)

Los tratamientos térmicos criogénicos son un complemento de los tratamientos térmicos convencionales, y su aplicación a materiales como los metales de transición y los metales básicos, y de otros materiales que actualmente son muy utilizados en la parte eléctrica es bastante escasa; es debido a este vacío de información que se presenta una gran oportunidad para la investigación; principalmente la razón de ser de este proyecto es aportar al estudio de las mejoras en las propiedades más representativas de un material muy utilizado en la industria como el aluminio, que son la conductividad y la dureza en este caso particular del aluminio

1350-H19, que es el más empleado en instalaciones eléctricas de media tensión, alta tensión y dispositivos de circuitos eléctricos y térmicos, por medio de un tratamiento térmico criogénico, para obtener una mejora; que implica una utilización más eficiente de la energía eléctrica, que a su vez se verá reflejada en un beneficio económico para su empleador, resaltando también que aumenta la vida útil del material usado como conductor eléctrico o térmico, en virtud de ello se abren nuevas formas de utilizar este tipo de aluminio, cabe mencionar que el aluminio es uno de los elementos más abundantes en el planeta y buscar nuevas formas de emplearlo resulta de gran utilidad no solo para la industria, también para el desarrollo. Por medio de este proyecto también se busca aportar al conocimiento de los tratamientos térmicos criogénicos que en este caso se enfocara aluminio 1350-H19 debido a su gran utilidad y versatilidad en aplicaciones tecnológicas y en cuanto a la parte eléctrica se refiere.

Las instituciones universitarias tienen como propósito impulsar el desarrollo y la innovación a través, de aporte social y científico realizado por sus egresados, pero como tal son las principales impulsadoras de la investigación a esto hacen referencia en su proyecto (Vargas Lozano & Sierra Gonzales, 2016, pág. 18)

Es así, como se propicia el desarrollo de nuevos estudios a través de instrumentos innovadores, desde entornos y espacios cotidianos como los académicos, es fundamental para una sobresaliente formación profesional. Centrándose específicamente en el área de estudio que alcance, el mejor método para promover el aprendizaje de las características y propiedades de los materiales que como ingenieros mecánicos se deben manipular mediante la práctica tangible, dejando de lado lo teórico para analizar comportamientos reales que se presentan al trabajar bajo condiciones ambientales extremas. Es así como se torna

importante proporcionar las mejores condiciones para estos ensayos, trayendo consigo resultados más precisos y aperturas a nuevas aplicaciones.

1.4.1. Perspectiva

Los tratamientos térmicos criogénicos han sido poco explorados pero con las investigaciones suficientes se pueden obtener grandes resultados que ayuden a descubrir nuevas mejoras y aplicaciones en materiales que antes no se tenían, los tratamientos térmicos criogénicos han sido poco investigados en Colombia y pocas empresas se han interesado en investigar este tipo de tratamientos , ya sea por falta de conocimiento o por no conocer los beneficios que se pueden llegar a obtener al aplicar este tipo de tratamiento a ciertos materiales.

Los tratamientos criogénicos son una herramienta eficaz para reducir las tensiones residuales de los materiales, en especial, cuando se aplican de forma repetida o en combinación con fases de calentamiento. Las tensiones residuales se pueden manifestar en servicio pero, muy a menudo, aparecen durante los procesos de mecanizado. Al eliminar material, se altera el equilibrio tensional de la pieza y pueden generarse deformaciones. Especialmente significativo es el caso de las aleaciones de aluminio. Por ejemplo, los componentes estructurales aeroespaciales suelen ser piezas ligeras y de paredes finas que, habitualmente, se fabrican a partir de un bloque sólido de aluminio. Durante el proceso de mecanizado se van liberando tensiones y, por este motivo, la pieza debe ser tratada para poder alcanzar los requisitos dimensionales exigidos. Con frecuencia, el tratamiento debe repetirse, una o más veces, a medida que avanza el proceso de mecanizado, especialmente durante las fases de acabado. (Álava , 2012)

El aluminio es un material de los más utilizados en la industria y encontramos muchas aplicaciones para este material. Los principales usos industriales de las aleaciones metálicas de aluminio son:

- Transporte; como material estructural en aviones, automóviles, trenes de alta velocidad, metros, tanques, superestructuras de buques y bicicletas.
- Estructuras portantes de aluminio en edificios.
- Embalaje de alimentos; papel de aluminio, latas, tetrabriks, etc.
- Carpintería metálica; puertas, ventanas, cierres, armarios, etc.
- Bienes de uso doméstico; utensilios de cocina, herramientas, etc.
- Transmisión eléctrica. Un conductor de aluminio de misma longitud y peso es más conductivo que uno de cobre y más barato. Sin embargo el cable sería más grueso. Medida en volumen la conductividad eléctrica es tan sólo el 60% de la del cobre. Su mayor ligereza reduce el esfuerzo que deben soportar las torres de alta tensión y permite una mayor separación entre torres, disminuyendo los costes de la infraestructura. En aeronáutica también sustituye al cobre.
- Recipientes criogénicos (hasta $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$), ya que contrariamente al acero no presenta temperatura de transición dúctil a frágil. Por ello la tenacidad del material es mejor a bajas temperaturas.
- Calderería.

(QuimiNet, 2011)

En todas estas aplicaciones existen ciertas propiedades que son esenciales para desempeñar cada función y existen distintas aleaciones de aluminio que cumplen con dichos requerimientos, pero en cuanto a la parte eléctrica se refiere uno de los más usados es el aluminio 1350-H19 debido a dos propiedades que son la conductividad y la dureza, debido a estas, están utilizado el aluminio; la primera que es de particular interés mejorar para que el material sea un mejor conductor y la segunda que no aumente demasiado para que el material no se vuelva tan frágil, pero que pueden tener un cambio significativo al aplicar este tratamiento.

Con este tratamiento criogénico se puede mejorar las propiedades de los materiales, con análisis micro estructural y ensayos de conductividad se determinan los resultados sobre los cambios en las propiedades del material implementado que es el aluminio 1350-H19 y así justificar el porqué de la aplicación de este tratamiento y determinar la magnitud de las mejoras en las propiedades del material. La propuesta de analizar mediante ensayos mecánicos los efectos de los tratamientos criogénicos a temperaturas de -196°C puede llegar a ser muy beneficioso para las pequeñas y grandes industrias ya que aplicar este tipo de Tratamiento es de bajo costo y de muy buenos resultados según estudios e Investigaciones realizadas, en consecuencia hacer más eficiente y aplicable este material; que al obtener un aumento, por minio que sea, en las propiedades estudiadas, se vería reflejada en un beneficio no solo en el uso más eficiente de la energía eléctrica también un beneficio económico para las empresas prestadoras de servicios eléctricos.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Determinar la incidencia de los tratamientos térmicos criogénicos en la dureza y la conductividad del aluminio 1350-H19.

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar la microestructura, la dureza y la conductividad de la materia prima.
- Aplicar el tratamiento térmico criogénico a diferentes tiempos de procesamiento.
- Determinar la microestructura, la dureza y la conductividad de los materiales luego del tratamiento térmico criogénico.
- Evaluar el efecto del tiempo de procesamiento sobre las propiedades medidas en los materiales.

1.6. Alcances y limitaciones

1.6.1. Alcances.

El estudio se realiza para determinar la incidencia de los tratamientos térmicos criogénicos en la dureza y conductividad del aluminio 1350-H19, tiene como alcance el mejoramiento de estas dos propiedades, teniendo en cuenta las etapas o ítems a realizar propuestos en los adjetivos, con el fin de lograr un resultado positivo que permita un ahorro económico en la implementación de este tipo de aluminio en la parte eléctrica, en específico en redes eléctricas de alta y media tención además de abrir puertas a nuevas aplicaciones del aluminio.

1.6.2. Limitaciones.

Existen dos limitaciones principales a la hora de desarrollar este proyecto el primero es la obtención de un termo para el almacenamiento de nitrógeno líquido, el cual por su elevado costo es difícil comprar, por lo tanto se requiere del alquiler o préstamo del mismo, y la segunda limitación es el uso de los laboratorios ya que no se cuenta con instalaciones y equipos propios, y se debe hacer uso de los que dispone la universidad, que es el lugar donde se ejecuta este proyecto; estos laboratorios cumplen con lo necesario para realizar el proyecto pero no cuenta con los equipos más recientes o los más avanzados para desarrollar las pruebas de tal manera que arrojen los resultados más exacto posible, como es necesario para el análisis de la conductividad eléctrica.

1.7. Delimitaciones

- **Delimitación espacial.** Los laboratorios de la universidad francisco de paula Santander, laboratorio de metalografía para la caracterización de la microestructura, laboratorio de física para la medición de la conductividad, y taller de fundición.
- **Delimitaciones temporales.** En cumplimiento de lo exigido por la universidad se emplea un tiempo mínimo de 3 meses a partir de la aprobación del proyecto

2. Marco referencial

2.1. Antecedentes

Con referencia a los tratamientos térmicos criogénicos se han realizado diferentes investigaciones, de las cuales se hará una breve descripción de cada una de ellas.

(Posso & Giraldo, 2017), en su tesis de grado titulada “Influencia de los tratamientos térmicos criogénicos en la dureza y resistencia al desgaste en aceros HSS (jaguar HSS 3/8x3)” encontraron que al someter estos materiales a tratamiento térmico convencional se obtiene un aumento en la dureza. En el trabajo se evaluó la influencia de los tratamientos criogénicos en un acero rápido HSS y específicamente en buriles utilizados para trabajos de mecanizado en torno. Se analizó una serie de resultados que permiten apreciar la influencia del tratamiento en este tipo de aceros, y finalmente se determinó la relación que existe entre la dureza y el tratamiento térmico criogénico. Los resultados muestran un aumento significativo de los valores de micro dureza Vickers para tiempos de tratamiento de 72 horas de inmersión en nitrógeno líquido de hasta un 11% frente a los buriles sin ningún tipo de tratamiento criogénico; y un aumento máximo de la dureza media en Rocwell C, HRC, de 2,21% a las 24 horas de tratamiento.

Este trabajo es sólo uno de la gran cantidad que se han realizado para aceros, sin embargo, estos estudios en materiales no ferrosos, como el aluminio, son muy escasos. De algunos de los que se puede dar una referencia se mencionan a continuación.

En el año 2016, Humberto Vargas & Kevin Sierra (Vargas Lozano & Sierra Gonzales, 2016), realizaron el estudio titulado “Influencia del tratamiento térmico de homogenizado y renevejecido seguido de un tratamiento criogénico en la microestructura y la dureza del aluminio 2024-T4”. Los resultados muestran que las durezas realizadas en 6 tiempos de envejecido

diferentes en muestras con tratamiento criogénico no varían considerablemente frente a muestras con los mismos tiempos de envejecido sin criogenia. En todos los intervalos de tiempo, a excepción del de 24 horas, los resultados muestran que los cinco datos de dureza tomados a las 18 probetas no varían considerablemente, por esta razón se atribuye que hay homogeneidad en la superficie y en los granos formados.

En el 2017, Gómez Jonathan & Gamba Brayan (Gomez Gomez & Gamba Guerrero), en su proyecto de grado titulado “Influencia del tratamiento térmico subcero en la resistencia a la corrosión, la dureza y la microestructura de la aleación de aluminio 2024-O3” encontraron un aumento de 3,38%, 2,19 unidades, en el valor de la microdureza Vickers, en muestras con tratamientos térmicos de homogenizado (AA 2024-O3) subcero por 30 minutos frente a las muestras sin tratamiento subcero.

También es necesario resaltar otras investigaciones en las que se ha podido corroborar la influencia de los tratamientos criogénicos en otras propiedades como lo determina Barajas Elkin & Costo John en su trabajo titulado análisis de la influencia del tratamiento criogénico en las aleaciones bronce SAE 64 y latón 60-40 por medio de ensayo de dureza, microdureza y pruebas de desgaste pin on disk.

Realizaron un estudio a tres tipos de materiales, con el fin de determinar los efectos que ocasiona un tratamiento térmico criogénico en las propiedades antes mencionadas, al aplicar dicho tratamiento, las metalografías mostraron una estructura dendrítica y al hacer el comparativo con las muestras del material antes del procedimiento, se establece que al paso de las horas del tratamiento se afinan las dendritas, se presenta una mejor distribución y afinamiento de dichas zonas. Al hacer un análisis en los tres materiales, aleaciones de cobre, bronce SAE 64 y latón 60-40 , y observar la influencia del tratamiento térmico criogénico finalmente se pudo

concluir que tiene un mayor efecto en el bronce. Según los resultados su dureza Brinell aumento, al igual que su resistencia al desgaste, según el análisis de metalografías su estructura se afinó evidenció un mayor orden en su estructura, lo que no se evidenció en el latón aunque este tuvo un aumento en su resistencia al desgaste.

2.2. Marco teórico

Es de gran importancia conocer y presentar las diferentes teorías sobre las cuales está sustentado en desarrollo del proyecto y poder dar a conocer todos los temas que se van a desarrollar en el proyecto.

2.2.1. Tratamientos térmicos

A través de los tratamientos térmicos podemos modificar las propiedades de los metales, mediante alteraciones de su estructura, pudiendo así desempeñar con garantías los trabajos demandados. Las aleaciones de tipo ferroso son las que mejor se prestan a ello.

El tratamiento térmico consiste en calentar el acero a una temperatura determinada, luego mantenerlo a esa temperatura durante cierto tiempo hasta que se forme la estructura deseada, y luego enfriarlo a la velocidad conveniente; la temperatura y tiempo de enfriamiento dependen del tipo de tratamiento térmico y de las propiedades que se deseen modificar. Los factores temperatura-tiempo deben ser muy bien estudiados dependiendo del material, tamaño y forma de la pieza. Con el tratamiento conseguiremos modificar microscópicamente la estructura interna de los metales, produciéndose transformaciones de tipo físico, cambios de composición y propiedades.

El tratamiento térmico en el material es uno de los pasos fundamentales para que pueda alcanzar las propiedades mecánicas para las cuales está creado.

Este tipo de procesos consisten en el calentamiento y enfriamiento de un metal en su estado sólido para cambiar sus propiedades físicas. Con el tratamiento térmico adecuado se pueden reducir los esfuerzos internos, el tamaño del grano, incrementar la tenacidad o producir una superficie dura con un interior dúctil. La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no férricas, y ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempos establecido.

Para conocer a que temperatura debe elevarse el metal para que reciba un tratamiento térmico es recomendable contar con los diagramas de cambio de fases como el de hierro - carbono. En este tipo de diagramas se especifican las temperaturas en las que suceden los cambios de fase (cambios de estructura cristalina), dependiendo de los materiales diluidos. (Vargas Lozano & Sierra Gonzales, 2016, pág. 20)

Dentro de los tratamientos térmicos más comunes tenemos

- Temple: El temple consiste en calentar el acero a una temperatura determinada por encima de su punto de transformación para lograr una estructura cristalina determinada (estructura austenítica), seguido de un enfriamiento rápido con una velocidad superior a la crítica, que depende de la composición del acero, para lograr una estructura austenítica, martensítica o bainítica, que proporcionan a los aceros una dureza elevada.
- Cementación: La difusión de carbono sobre la superficie se denomina cementación. Este procedimiento consiste en el calentamiento de las piezas a una temperatura de

aproximadamente 900 °C en un medio en el que el carbono penetre en la superficie del acero en función del tiempo. Se puede efectuar este procedimiento con medios sólidos (carbón de madera con aditivos, baño de sales con cianuros), o con medios gaseosos CO, H₂, N₂, CmHn. La utilización de medios gaseosos es la más utilizada ya que permite un control de la profundidad del tratamiento.

- **Nitruración:** La adición de nitrógeno a la superficie se denomina nitruración, dicho procedimiento consiste en el enriquecimiento de la superficie manteniendo el acero (de aleación especial con cromo, vanadio, aluminio), a una temperatura de aproximadamente 550 °C, sea en baño de sales o en una atmósfera de amoníaco durante un tiempo determinado. Sin más tratamientos se alcanza de ésta manera una dureza superficial extremadamente alta con un mínimo de deformaciones, debido a la baja temperatura del tratamiento.
- **Revenido:** Normalmente, a continuación del temple se efectúa un tratamiento, denominado revenido. Si un acero se temple correctamente, alcanza su máxima dureza, que depende en primer lugar de su contenido en carbono, pero el acero en este estado es muy frágil y en consecuencia debe ser revenido a una temperatura entre 150 °C y el punto de transformación del mismo. Los revenidos efectuados entre 150-220 °C influyen poco en la dureza pero mejoran la resistencia, eliminando una parte de las tensiones producidas durante el enfriamiento. Esta clase de revenido se utiliza sobre todo en aceros para herramientas que requieren una gran dureza, en otros casos se efectúan los revenidos entre los 450-600 °C.
- **Recocido:** El recocido pretende conseguir lo contrario que el temple, es decir un ablandamiento del material que se consigue al poner en equilibrio la estructura cristalina

que se había deformado por el frío, por tratamientos térmicos o por la mecanización de la pieza.

- Normalizado: El normalizado es un recocido que se efectúa para proporcionar una buena y fácil mecanización de las piezas, lo cual depende de su estructura cristalina. El normalizado se efectúa antes del temple, ya que el resultado de éste depende del estado inicial de la estructura de las mismas. También se realizan recocidos para la eliminación de tensiones a temperaturas inferiores al punto de transformación.

Muchas veces se efectúan recocidos en piezas que previamente fueron templadas y revenidas. Para ello debe elegirse una temperatura que logre la disminución de la dureza y la resistencia.

La temperatura baja exigida puede ser compensada por la duración del recocido.

La velocidad de enfriamiento después del recocido tiene una gran importancia, ya que un enfriamiento rápido puede provocar nuevas tensiones y si es demasiado lento existe el peligro de fragilidad. (matalmecanica, 2002)

2.2.2 Efecto de los tratamientos térmicos en el aluminio

El tratamiento térmico para endurecer las aleaciones de aluminio se basa en variación de la solubilidad de los compuestos en la solución de aluminio básica y concretamente es el caso de las aleaciones Al-Cu, en la variación de la solubilidad del compuesto Cu en el aluminio.

El temple es la designación que sigue a la de aleación y se halla separada de ésta por un guión y es utilizada en los aluminios forjados y fundidos; se basa en las secuencias de los tratamientos básicos utilizados para producir los diversos temples. El sistema estándar de designación de temple consta de una letra que indica el temple básico. Excepto para los temples

en condición de recocido y aquellos en condición de fabricado, sin tratamiento térmico se definen más específicamente por la adición de uno o más dígitos. Hay cuatro temples básicos: F, condición de fabricado; O, recocido; H, endurecido por deformación y T tratado térmicamente.

Para las aleaciones de la serie 2000, las aleaciones que contienen entre 2.5 y 5 % de cobre responderán al tratamiento térmico endureciéndose por envejecido. La fase theta (θ) es una fase intermedia de aleación, cuya composición corresponde estrechamente al compuesto Cu_2Al . El tratamiento de solución se lleva a cabo al calentar la aleación hasta la región unifásica Kappa (K), seguida por enfriamiento rápido. El envejecido subsecuente, ya sea natural o artificial permitirá precipitar la fase θ , incrementando así la resistencia de la aleación; estas aleaciones pueden contener menores cantidades de silicio, hierro, magnesio, manganeso y zinc. (Vargas Lozano & Sierra Gonzales, 2016, pág. 22)

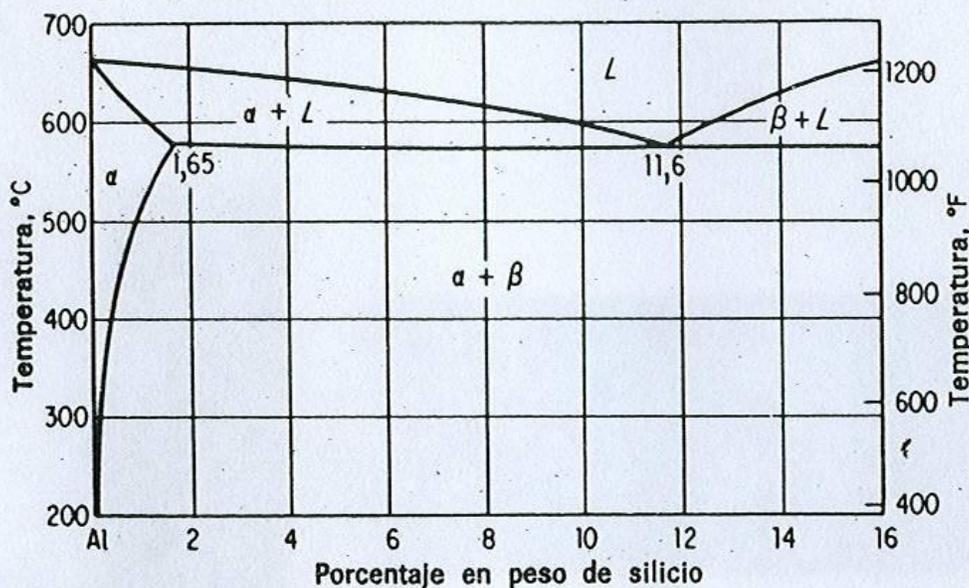


Fig. 12.17 Diagrama de equilibrio aluminio-silicio. Región rica en silicio. (Tomado del "Metals Handbook", edición de 1948, pág. 1166, American Society for Metals, Metals Park, Ohio.)

Figura 1. Diagrama Aluminio Silicio.

Fuente: UPV. Julio Alberto Aguilar Schafer

El diagrama de aluminio silicio figura 1 nos permite tener una referencia de comportamiento del aluminio a altas temperaturas, sin embargo es poca la información de este tipo que se tiene del comportamiento de las diferentes aleaciones de aluminio frente a muy bajas temperaturas.

2.2.3 Tratamiento Térmico Criogénico

El tratamiento criogénico consiste en la exposición de los materiales a temperaturas muy bajas cercanas al punto de ebullición del nitrógeno, -196°C , al igual que el proceso subcero el descenso y el posterior calentamiento hasta temperatura ambiente debe ser muy lento y controlado para evitar la aparición de tensiones en el material que puedan generar grietas o fisuras.

Los tratamientos criogénicos se usan para mejorar las propiedades mecánicas de los aceros en especial en los aceros para herramienta. Los resultados que se logran con estos tratamientos son: endurecimiento en toda la estructura del material y mayor durabilidad en los aceros. (Posso & Giraldo, 2017, pág. 24)

Este tratamiento produce un incremento de la dureza entre 2 y 5 puntos Rockwell C, transforma la austenita en martensita y también produce la precipitación de nanos carburos sobre los límites de grano en los aceros. Una ventaja adicional, con respecto al tratamiento térmico subcero, es que el proceso criogénico reduce las segregaciones (concentraciones localizadas de aleantes) ya que promueve el transporte de los aleantes del acero homogenizando contenido en la

pieza; además, globuliza los carburos, lo que aumenta la tenacidad del material. Estos dos últimos efectos dan una mayor resistencia y durabilidad a los materiales tratados a temperaturas criogénicas, respecto de los tratados con temperaturas subcero. (Vargas Lozano & Sierra Gonzales, 2016, pág. 24)

La Aluminium Association inc (AAI), clasifica las aleaciones de aluminio mediante la siguiente nomenclatura :

Tabla 1. Características de las series del aluminio.

Fuente: MIPS A

Características de las series del aluminio			
Serie	Composición	Características	Usos
Serie 1000	Aluminio con un mínimo de pureza de 99%	<ul style="list-style-type: none"> • Alta resistencia a la corrosión • No tóxico • Excelente acabado • Excelente maleabilidad • Alta conductividad eléctrica y térmica • Excelente reflectividad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recipientes ▪ Materiales de radiación
Serie 2000	Aleado con Cobre	<ul style="list-style-type: none"> • Alta resistencia mecánica • Alta resistencia a la corrosión • Buena maquinabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rines de camiones ▪ Suspensión de camiones ▪ Fuselaje de aviones
Serie 3000	Aleado con Manganeso	<ul style="list-style-type: none"> • Buena resistencia mecánica • Alta resistencia a la corrosión • Buena maleabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Botellas para bebidas ▪ Utensilios de cocina ▪ Intercambiadores de calor ▪ Mobiliario ▪ Señales de tráfico ▪ Tejados ▪ Otras aplicaciones arquitectónicas

Serie 4000	Aleado con Silicio	<ul style="list-style-type: none"> • Alta resistencia al calor 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aplicaciones arquitectónicas ▪ Fabricación de pistones de motores
Serie 5000	Aleado con Magnesio	<ul style="list-style-type: none"> • Buena resistencia mecánica • Alta resistencia a la corrosión, especialmente al agua de mar • Muy buena soldabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adornos decorativos ▪ Ornamentales y arquitectónicos ▪ Iluminación de las calles y carreteras ▪ Botes, barcos y tanques criogénicos ▪ Partes de puentes ▪ Estructuras de automóviles
Serie 6000	Aleado con Silicio-Magnesio	<ul style="list-style-type: none"> • Buena resistencia mecánica • Buena resistencia a la corrosión • Buena maquinabilidad • Buena soldabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aplicaciones arquitectónicas ▪ Cuadros de bicicletas ▪ Pasamanos de los puentes ▪ Equipo de transporte ▪ Estructuras soldadas
Serie 7000	Aleado con Zinc	<ul style="list-style-type: none"> • Alta resistencia mecánica 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estructuras de los aviones ▪ Equipos móviles ▪ Otras partes altamente forzadas

Tabla 2. Sistemas básicos de normalización.

Fuente: MIPS A

Sistema básico de normalización	
F	Material extruido sin temple, sin ningún tratamiento posterior.
O	Recocido mediante tratamiento térmico.
H	Endurecido mediante tratamiento mecánico (Por deformación).
T	Temple obtenido por tratamiento térmico con o sin tratamiento mecánico.

Tabla 3. Tipos de temple para el aluminio.

Fuente: MIPS A

Tipos de temple para el aluminio	
O	Sin temple, aplica a productos de los que se requiere tener el mínimo de propiedades mecánicas, además de contar con la mayor ductilidad y estabilidad dimensional
H	Alta resistencia, aplica para productos que requieran ver incrementada de manera mecánica su resistencia, con o sin proceso complementario de tratamiento térmico, endurecido por deformación
H12	Dureza baja y/o de un cuarto
H14	Dureza media
H16	Dureza tres cuartos
H18	Dureza alta
H19	Extra duro
F	Condición de fabricación
T	Tratado térmicamente

En resumen el significado de la nomenclatura del aluminio que se tiene por objeto de estudio es la Siguiete: se usa la nomenclatura AA (Asociación del **Aluminio**) más cuatro dígitos internacionales

Primer dígito: elemento dominante 1xxx, aluminio 99%.

Segundo dígito: control de impurezas 13xx, control especial.

Tercer y cuarto dígito: indica el porcentaje mínimo de aluminio sobre 99%, 1350, aleación con el 99,50% de pureza.

H19 es la nomenclatura de los temple, se usa la nomenclatura H (hardened/curtido) que identifican los procesos seguidos para obtener el producto final.

Primer dígito: tipo de trabajo, H 1x, en frío solamente.

Segundo dígito: grado de dureza, H 19, muy duro.

El aluminio 1350 es un aluminio comercial de alta pureza con un 61 por ciento de conductividad. La resistencia a la tracción de cada temperamento 1350 está determinada por la cantidad de trabajo dado al metal durante la fabricación. (SIGNI, 2019)

Composición química del aluminio 1350

Tabla 4. Composición química del aluminio.

Fuente: SIGNI

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	V+Ti	Otras		Al.
								Individual	Total	
Max. 0.10	Max. 0.40	Max. 0.05	Max. 0.01	—	Max 0.01	Max. 0.05	Max. 0.02	Max. 0.03	Max 0.10	Min. 99.50

2.2.4 conductividad eléctrica

Ohm comprobó que al someter los extremos de un material metálico a una diferencia de potencial V aparecía una corriente eléctrica I en el interior de éste, de forma que dicha diferencia de potencial e intensidad estaban ligadas a través de una magnitud física llamada resistencia eléctrica R , de acuerdo a la ley que lleva su nombre:

$$V = R \cdot I \text{ (Ecuación 1)}$$

La conductancia σ es un concepto opuesto cualitativamente e inverso cuantitativamente al de resistencia. Nos indica una aptitud o facilidad para el paso de corriente por un material. Lógicamente, habrá materiales con mejor o peor conductividad, e incluso para el mismo material, diseños más o menos apropiados para la conducción.

Definimos la resistividad como la resistencia que al paso de la corriente eléctrica ofrece un material por unidad de longitud y unidad de sección. La conductividad sería la inversa de la resistividad. Esto se expresa matemáticamente mediante la ecuación

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = R \frac{A}{L} \text{ (Ecuación 2)}$$

Siendo:

ρ , la resistividad en Ωcm

A , superficie en cm^2

σ , la conductividad en $(\Omega\text{cm})^{-1}$

L , longitud en cm

R, resistencia en Ω

Por convenio internacional, también se expresa la conductividad en términos porcentuales, de manera que se toma como conductividad relativa 100 % IACS, la que corresponde a la del Cu recocido cuya resistividad es $1.724 \mu\Omega\text{cm}$ a la temperatura de 20°C

Son distintas técnicas de ensayo que tienen por objeto determinar el parámetro **resistencia eléctrica**, de la cual puede calcularse la **resistividad** de los materiales conociendo previamente el **factor geométrico**. Se requiere diferente equipamiento, en función de la orientación física y matemática de los ensayos.

- **Método basado en la ley de Ohm:** Consiste en la determinación de la resistividad a partir de la verificación de la ley de Ohm sobre el material que se ensaya. La figura 2 representa un esquema del montaje experimental, y que consta de fuente de alimentación, amperímetro y polímetro.

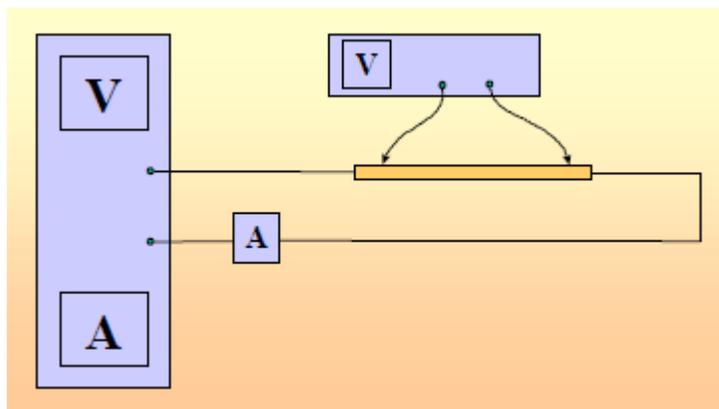


Figura 2. Método basado en la ley de ohm.

Fuente: fundamento de ciencia de los materiales (William F.Smith)

Las probetas pueden ser cilíndricas, planas o hilos, pero se recomienda que su longitud sea del orden o mayor que la sección por la que pasa el flujo eléctrico, por razones de precisión y sensibilidad del instrumental. En la figura 3 podemos apreciar los parámetros geométricos de la probeta plana, necesarios para calcular la resistividad.

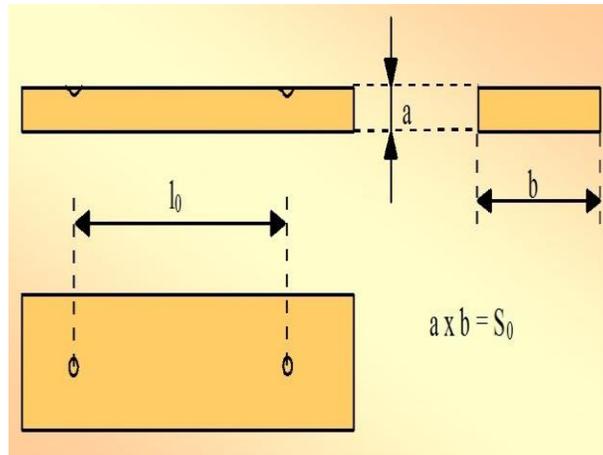


Figura 3. Probeta y magnitudes del parámetro geométrico.

Fuente: fundamento de ciencia de los materiales (William F. Smith)

- **Método directo:** Este procedimiento permite determinar la resistividad, midiendo la resistencia del material en un puente de Wheastone o de Kelvin, figura 4. La ventaja radica en una mayor precisión y simplificación del equipamiento, reduciendo los efectos térmicos sobre el valor de la resistividad por el paso de la corriente (efecto Joule). (fundamentos de ciencia de los materiales, 2016)

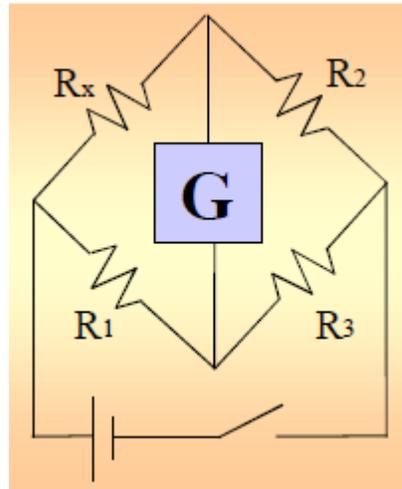


Figura 4. Método directo.

Fuente: fundamento de ciencia de los materiales (William F.Smith)

2.2.5. Ensayo de Dureza

La dureza es la resistencia que presenta un material a la penetración de uno más duro, se utiliza para conocer la resistencia superficial de los materiales. Existen tres métodos para evaluar la dureza de un material: los que miden la oposición de un material a ser rayados, los que miden la resistencia a la penetración y los que miden la dureza elástica o al rebote. En la actualidad los métodos más utilizados son: brinell, rockwell, vickers y shore. (Posso & Giraldo, 2017, pág. 17)

2.3 Marco conceptual

- **Tratamiento térmico criogénico:** (Dry Deep Cryogenic Treatment) Consiste en someter un material a temperaturas criogénicas de -196°C , utilizando nitrógeno líquido, o una cámara criogénica en el cual se puede variar esta temperatura. (Posso & Giraldo, 2017, pág. 21)
- **Dureza:** La dureza es la oposición de un material a dejarse rayar, penetrar, taladrar hacer deformaciones permanentes entre otras, se dice que la madera tiene muy baja dureza. La dureza se mide con un durómetro por medio de un ensayo de penetración. (Posso & Giraldo, 2017, pág. 21)
- **Conductividad eléctrica:** La conductividad eléctrica es la capacidad de la materia para permitir el flujo de la corriente eléctrica a través de sus partículas. Dicha capacidad depende directamente de la estructura atómica del material, así como de otros factores físicos como la temperatura a la que se encuentre o el estado en la que esté. (concepto de, 2019)
- **Austenita:** Es el constituyente más denso de los aceros y está formado por una solución sólida por inserción de carbono en hierro gamma. La austenita está formada por cristales cúbicos centrados en las caras, con una dureza de 300 Brinell, una resistencia a la tracción de 100 kg/mm^2 y un alargamiento del 30 %, no es magnética. (Ecured, 2019)
- **Nitrógeno líquido:** El nitrógeno líquido es nitrógeno puro en estado líquido a una temperatura igual o menor a su temperatura de ebullición, que es de $-195,8^{\circ}\text{C}$ a una presión de una atmósfera. El nitrógeno líquido es incoloro e inodoro. Su densidad en el

punto triple es de 0,807 g/ml. Se produce industrialmente en grandes cantidades por destilación fraccionada del aire líquido. A la hora de manipular es recomendable leer la HDSP (hoja de seguridad del producto) debido a que es un gas inerte (desplaza el oxígeno) y debido a su baja temperatura puede producir quemaduras. .(Posso, 2017, p,22)

- **Martensita:** Es el nombre que recibe la fase cristalina BTC (Body Center Tetragonal, Tetragonal Centrada En El Cuerpo). La estructura de la martensita tiene forma de agujas o de láminas y se considera que los aceros con estructura martensita son muy duros. (Posso & Giraldo, 2017, pág. 21)
- **Cobre:** Cuyo símbolo es Cu, es el elemento químico de número atómico 29. Se trata de un metal de transición de color rojizo y brillo metálico se caracteriza por ser uno de los mejores Conductores de electricidad (el segundo después de la plata). Gracias a su alta conductividad eléctrica, Ductilidad y Maleabilidad, se ha convertido en el material más utilizado para fabricar cables eléctricos y otros componentes eléctricos y electrónicos. Es el tercer metal más utilizado en el mundo, después del hierro y el aluminio. (Ecured, 2019)
- **Aluminio:** El aluminio es un elemento químico, su símbolo es Al y su número atómico 13. Se trata de un metal no ferromagnético. En estado natural se encuentra en muchos silicatos (feldespatos, plagioclasas y micas). Como metal se extrae únicamente del mineral conocido con el nombre de bauxita, por transformación primero en alúmina mediante el proceso Bayer y a continuación en aluminio metálico mediante electrólisis. (Ecured, 2019)

- **Bronce:** Es una aleación de cobre y estaño, en diversas proporciones, con un mínimo de 75% de cobre, pero no puede pasar de ciertos límites porque se vuelve frágil. El estaño transmite al cobre la resistencia y dureza. Con un 6% no se puede trabajar en frío, alcanzándose con un 17% la máxima resistencia a la tracción. (Ecured, 2019)
- **Carbono:** El carbono es un elemento químico el cual es muy usado en la industria, se encuentra en formas alotrópicas cristalinas, diamante y grafito. Las propiedades físico químicas dependen de la estructura cristalina del elemento. (Posso & Giraldo, 2017, pág. 21)
- **AAC:** All Aluminium Conductor o conductor de aluminio.
- **XLPE:** polietileno reticulado, conocido por sus abreviaturas como PEX o XLPE, es una forma de polietileno con reticulaciones.
- **Nucleación:** Al hecho de que se unan y ordenen átomos, pasando del estado líquido al sólido en una forma de núcleo del tamaño necesario para permanecer en estado sólido, se le llama nucleación. Antes de alcanzar el tamaño necesario a los átomos aglomerados se les nombra normalmente como embrión, el cual es un núcleo de menor tamaño. (Zúñiga, 2012)
- **Dendritas (cristalografía):** Cristal que tiene una configuración de tipo arborescente, más evidente en metales fundidos y lentamente enfriados a través del intervalo de solidificación. (UNMSM, 2011)
- **Media Geométrica:** Se define la media geométrica como la raíz enésima del producto de "n" términos y se usa generalmente para: Promediar razones, Tazas de cambio, Progresiones geométricas equilibrándolas, Promediar promedios de ventas, Tasa de

crecimiento de las poblaciones (UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO FACULTAD DE CIENCIAS ADMINISTRATIVAS, 2012)

- **Mediana:** Es el valor que impide a una distribución de modo tal que a cada lado de ella queda un número igual de términos. (UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO FACULTAD DE CIENCIAS ADMINISTRATIVAS, 2012)
- **Desviación Estándar:** La desviación estándar puede ser interpretada como una medida de incertidumbre. La desviación estándar de un grupo repetido de medidas nos da la precisión de éstas. (UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO FACULTAD DE CIENCIAS ADMINISTRATIVAS, 2012)
- **Coefficiente De Variación:** es una medida de dispersión que permite el análisis de las desviaciones de los datos con respecto a la media y al mismo tiempo las dispersiones que tienen los datos dispersos entre sí. (Univercidad Autonoma Del Estado De Hidalgo, 2020)

2.4. Marco legal

- **ASTM E92-Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.**
Norma que rige todos los parámetros establecidos para realizar ensayos de micro dureza
- **ASTM E 10-78. Standard Method of test for Brinell hardess of Metallic materials.** American Society for testing and materials. Philadelphia, USA 1978.
- **UNE 21354:1976 Metodo De Medida De La Resistividad De Los Materiales Metalicos**

Norma que rige todos los parámetros establecidos para realizar el ensayo de dureza brinell.

Los siguientes requisitos son estipulados mediante la normativa del estatuto estudiantil universitario. (Universidad Francisco de Paula Santander, 1996).

Capítulo I, ARTÍCULO 139. El trabajo de grado es un requisito exigido por el plan de estudios y tiene como objetivos:

a). Brindar al estudiante la posibilidad de manifestar de manera especial su capacidad investigativa, su creatividad y disciplina de trabajo mediante la aplicación integral de los conocimientos y métodos requeridos.

B). Servir como instrumento de servicio de extensión a la comunidad y medio de generación del conocimiento.

C). facilitar al estudiante su participación y concurso en la solución de problemas comunitarios.

D). facilitar al estudiante una mayor autonomía en el desarrollo de trabajos científicos, científico-tecnológicos y profesionales propios de su formación.

- Capítulo III, ARTÍCULO 123: El título Profesional es el cualificativo que obtiene el estudiante con la terminación de un programa académico de educación universitaria, que lo acredita para desempeñarse en su profesión. Según la ley.
- ARTICULO 124. Los siguientes requisitos son los exigidos por la universidad para la obtención del título profesional:
 - Haber aprobado todas las asignaturas estipuladas por el Plan de Estudios.

- Haber elaborado y sustentado un Proyecto de Grado
- No tener deudas pendientes por ningún concepto con la institución.
- Cancelar el valor de los derechos de grado.
- Hacer las solicitudes escritas a la Facultad respectiva por lo menos quince (15) días antes de la fecha fijada, acompañando tal requerimiento de los documentos exigidos para tal fin.
- Demostrar conocimiento en el idioma Ingles, de acuerdo a los requisitos definidos por el Consejo Académico.
- Cumplir con los cursos de Formación Integral definidos por el Consejo académico.
- Presentar los Exámenes de Estado de Calidad de la Educación Superior, establecido en el Decreto 3963 de 2009

3. Diseño metodológico

3.1. Tipo de proyecto

De acuerdo a lo establecido en el estatuto estudiantil de la Universidad Francisco de Paula Santander, capítulo I, artículo 149, es un trabajo de investigación, porque en su desarrollo se busca la generación y aplicación de conocimientos utilizados en los estudios de la carrera de ingeniería mecánica.

3.2. Instrumentos para la recolección de información

3.2.1. Fuentes secundarias: contienen información organizada, elaborada, producto de análisis, extracción o reorganización que refiere a documentos primarios originales. Son fuentes secundarias: enciclopedias, antologías, directorios, libros o artículos que interpretan otros trabajos o investigaciones. Este proyecto se realiza basado netamente en fuentes de información secundarias y que se basa en teorías, conceptos y antecedentes aprobados científicamente y de origen primario. (Biblioteca universitaria de alcala , 2019)

3.3. Fases del proyecto

Fase I: Determinar la microestructura, la dureza y la conductividad de la materia prima.

Fase II: Aplicar el tratamiento térmico criogénico a diferentes tiempos de procesamiento.

Fase III: Determinar la microestructura, la dureza y la conductividad de los materiales luego del tratamiento térmico criogénico.

Fase IV: Evaluar el efecto del tiempo de procesamiento sobre las propiedades medidas

4. procedimiento experimental

Para desarrollar los ensayos se reunió y seleccionó información de medios físicos y digitales que ayudaron a tener una base sólida inicial de conocimientos, permitiendo identificar posibles patrones de comportamiento y composición del material, los cuales sirvieron como guía y soporte en el desarrollo de la investigación. También la preparación y estudio de las normas que intervienen en los ensayos, y sirven como respaldo de la investigación, en este caso la

dureza, conductividad y durante el proceso de revelado de la microestructura, ya que estas normas están basadas en estándares internacionales.

El material objeto de estudio es el aluminio 1350 H-19, específicamente muestras de cables concéntricos de aluminio 1350 H-19, AAC, con cubierta con XLPE, calibre 1/0 normalización americana en AWG (American Wire Gauge), número de hilos 19, diámetro de hilo 1,89 mm, espesor de aislamiento 1,52 mm, diámetro exterior 12,3 mm, todas las especificaciones de la materia prima se encuentran en el anexo A, el cable se cortó transversalmente con un disco de corte del laboratorio de máquinas y herramientas, para obtener muestras de 1,5 cm de largo; se cortaron un total de 13 muestras, para 6 tiempos, dos muestras para cada tiempo y dejando una muestra sobrante como evidencia del material antes del tratamiento térmico criogénico.



Figura 5. Materia prima

Fuente: (general cables, 2018)

5. Prueba metalográfica

Para que la prueba metalográfica sea exitosa y poder observar la microestructura del material, se debe tratar la superficie; para lograrlo el proceso se dividió en 4 pasos:

1. Corte de muestras.
2. Montaje y Empestillado de muestras y probetas metalográficas.
3. Desbaste, Lijado y Pulido - Ataque Químico.
4. Examen Microscópico y Análisis de Imagen

5.1. Corte de muestras.

El material de las muestras es un cable concéntrico de aluminio 1350 H-19, AAC, con cubierta con XLPE, se le hicieron cortes transversales con un disco de corte Fino T41 9 X 5/64 X 7/8 Dewalt Dw80671a, para obtener muestras de 1.5 cm de longitud.



Figura 6. Disco de corte Fino T41 9 X 5/64 X 7/8 Dewalt Dw80671a



Figura 7. Muestras cortadas

5.2. Montaje y Empestillado de muestras y probetas metalográficas.

Dada la forma y condiciones del material no fue necesario el empastillar la muestra en baquelita por lo tanto este proceso no fue incluido.

5.3. Desbaste, Lijado y Pulido - Ataque Químico.

Una vez cortado el material, se procede a desbastar la superficie con el fin de eliminar los accedentes del material y las líneas dejadas por el disco de corte así como nivelar la superficie a pulir, esto con lija 150, luego se sometieron a lijado manual aplicando lijas de agua desde numero 320 a 3000 para conseguir un pre-pulido y eliminar las rayas en la superficie.

Una vez completado el proceso de lijado hasta lija 3000, se procede a pulir utilizando paño de billar y alúmina como material abrasivo a 450 rpm para conseguir el brillo espejo; todo el proceso se realizó en el laboratorio de metalografía de la facultad de ingeniería.

Posteriormente se realizó el ataque químico teniendo en cuenta la norma internacional ASTM E 407-99 standard practice for microetching metals and alloys, para aluminios de la serie 1000, usando el reactivo modified keller's reagent (reactivo de keller modificado), el cual posee las siguientes especificaciones: 2 ml de ácido Fluorhídrico (HF), 3 ml de ácido clorhídrico (HCL), 5 ml de ácido nítrico (HNO₃) y 190 ml de agua ; con un tiempo de exposición de 30 a 60 segundos (según la norma) para todas las muestras, ajustando al que mejor revelara la microestructura.

Tabla 5. Ataque químico

MUESTRA	TIEMPO EN CRIOGENIA	TIEMPO DE EXPOSICION (ataque químico)
Materia prima (x)	0	60
M6	16	60
M5	24	60
M4	48	60
M3	72	60
M2	120	60
M1	168	60

6. Tratamiento térmico criogénico al aluminio 1350 H-19

Para realizar el tratamiento térmico criogénico al aluminio, se utilizó nitrógeno líquido, para mantener una temperatura constante de -196°C , se empleó un tratamiento criogénico convencional húmedo, con el fin de garantizar el sostenimiento de la temperatura se utilizó un termo YDS 2-35 de 2 litros de capacidad que asegura conservar las muestras a la temperatura deseada. El termo consta de tres compartimentos donde se colocan las muestras para ser

sumergidas en el nitrógeno líquido, el termo debe colocarle en un lugar fresco y no debe estar expuesto a la luz solar ni a temperaturas extremas.

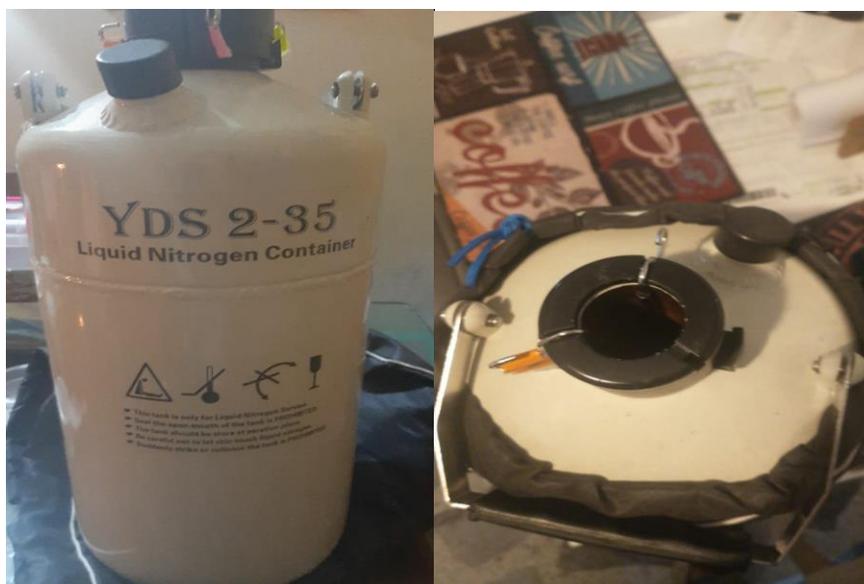


Figura 8. Termo YDS 2-35

Las muestras de material pulidas se sumergen en el nitrógeno líquido dispuesto en el termo y posteriormente retiradas una vez cumplido el tiempo establecido; se prepararon dos muestras por tiempo y se ingresaron de dos en dos a criogenia, teniendo en cuenta que el proceso de exposición de todas las muestras debía terminar simultáneamente, para luego dejar calentar a temperatura ambiente. La temperatura promedio en la cual se desarrolló el tratamiento y enfriamiento de las muestras es la temperatura ambiente del lugar de 28°C . Para determinar el tiempo de exposición o de tratamiento criogénico, se parte de la teoría que en los aceros después de 24 horas de tratamiento el material ya ha alcanzado su resultado deseado y basado en antecedentes, recomendaciones y experiencias con otros materiales incluido el aluminio, se establecieron los intervalos de tiempo que se muestran en la tabla 5, lo cual permitirá evidenciar los posibles cambios y variantes que pueda presentar en el material.

Tabla 6. Intervalos de tiempo

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Tiempo (horas)	16	24	48	72	120	168
muestras	2	2	2	2	2	2

Tabla 7. Distribución de muestras por tiempo

Variables	tiempo	Numero de probeta
T1	16	1
		2
T2	24	3
		4
T3	48	5
		6
T4	72	7
		8
T5	120	9
		10
T6	168	11
		12

7. Micrografías

Por medio del pulido y el ataque químico, se logra revelar la microestructura del material, para la observación de las muestras se usaron dos microscopios, un microscopio Leica DM LM y un microscopio óptico Zeiss Axio Scope A1 este último se usó para tomar las micrografías, ambos equipos pertenecen a la Facultad de ingeniería de la Universidad Francisco de Paula Santander, el cual tiene una capacidad de aumento máxima de 1000x.



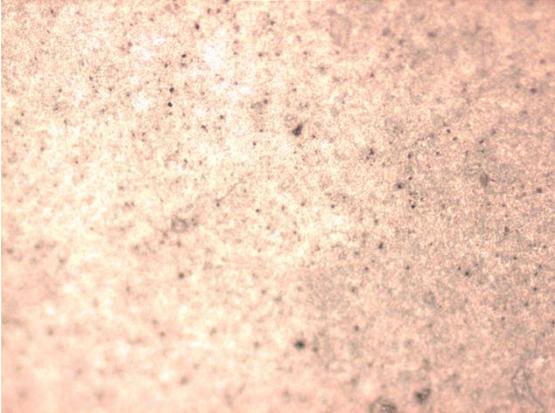
Figura 9. Microscopio Leica DM LM

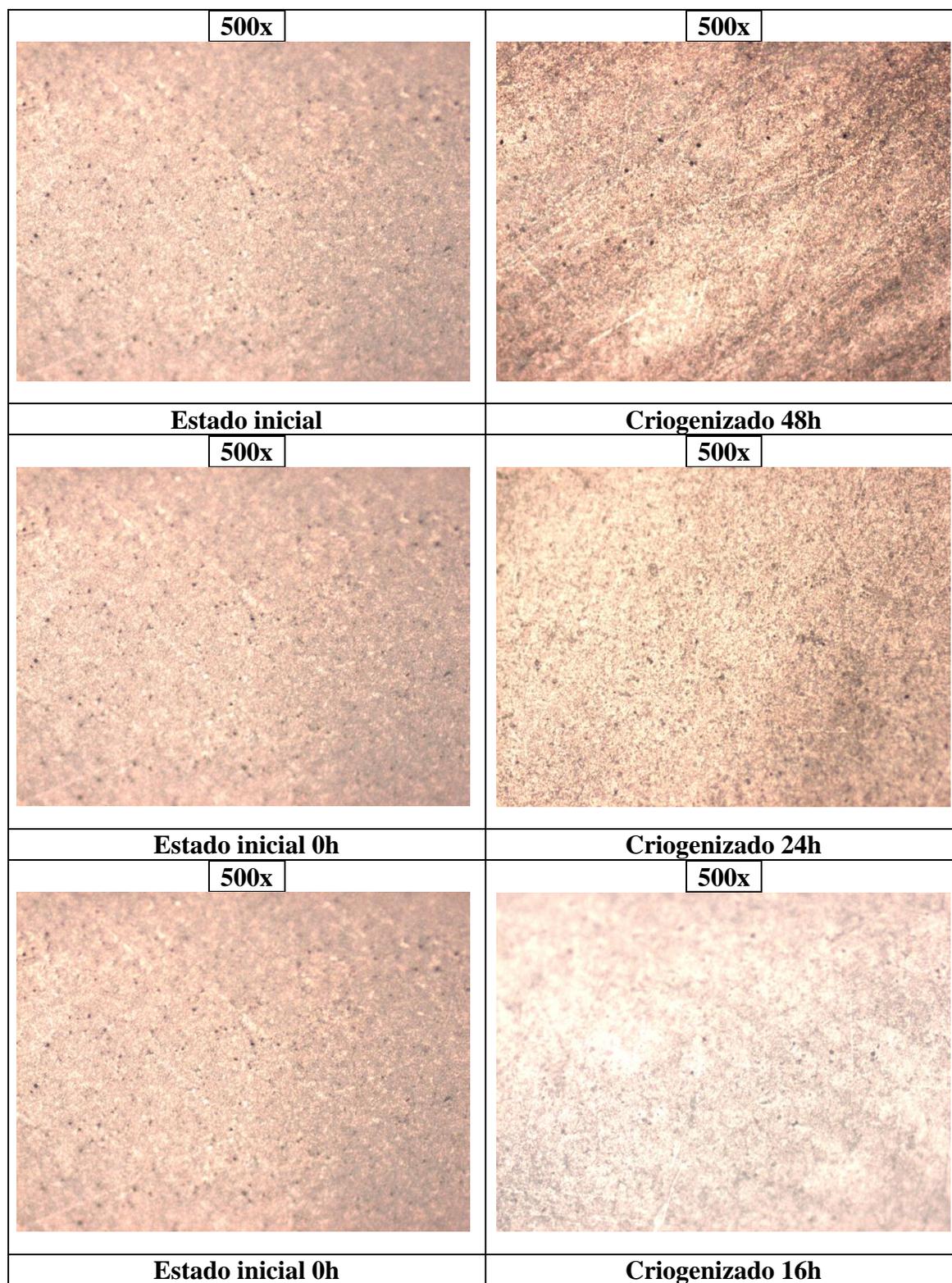


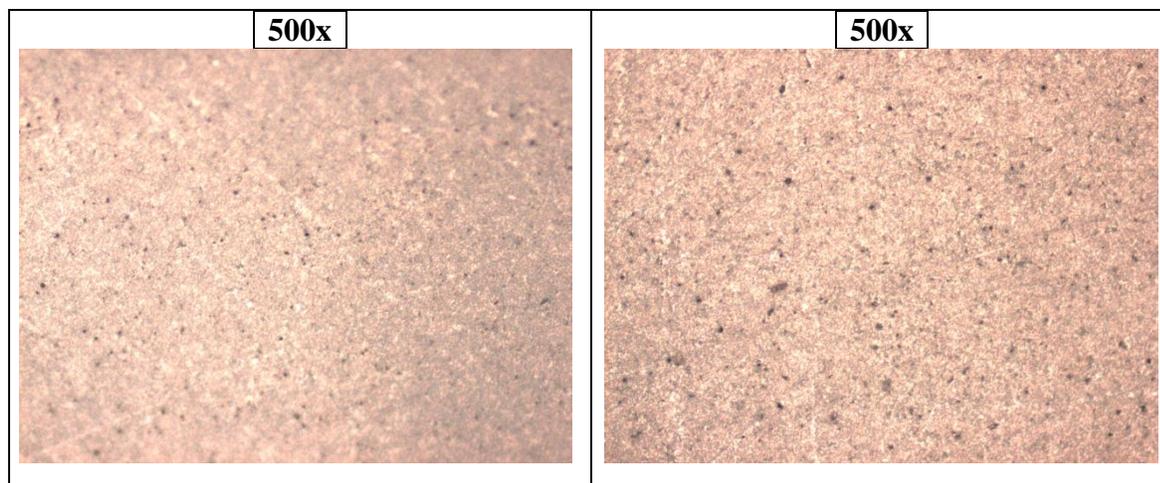
Figura 10. Zeiss Axio Scope A1

Se tomaron las fotografías correspondientes a 500x de aumentos en cada uno de los tiempos; con el fin de hacer un cuadro comparativo que permita contrastar las muestras y observar los posibles cambios en el material al aplicar el tratamiento.

Tabla 8. Cuadro comparativo de las muestras a diferentes tiempos de criogenia

Micrografías	
Estado inicial 0h	Criogenizado 168h
500x 	500x 
Estado inicial 0h	Criogenizado 120h
500x 	500x 
Estado inicial 0h	Criogenizado 72h





En la tabla 8 se muestran las micrografías del material para un tiempo de criogenia de 0,16,24,48,72,120 y 168 horas: Desde las micrografías se evidencia solo una fase, propio del tipo de material, aluminio 1350, con el 99,50% de pureza y templado en frío. No se alcanza a apreciar límites de grano. Se aprecian algunos puntos negros, que muy probablemente correspondan a compuestos como $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$, tal como se ha reportado por otros investigadores (COGOLLO) y que se correspondería con la composición química de este material mostrada en la Tabla 4 en la cual las principales impurezas son Fe y Si. Se descarta la posibilidad de poros, puesto que por el proceso de fabricación, difícilmente estos que se hubiesen formado en los procesos iniciales permanecerían luego de los procesos de conformado plástico. No se aprecian cambios en la microestructura debido al proceso de criogenización. Algunas evidencias de la micrografía de materiales similares se pueden encontrar en antecedentes como el de (Leonel salazar, 2020) donde se muestran las micrografías de un aluminio para un tiempo de revenido de: 0, 6, 8, 10 y 12 horas (templado anteriormente).

5.0. Prueba de dureza

La dureza es la resistencia de un material a ser penetrado, en materiales blandos se mide microdureza y la más empleada para materiales como el aluminio es la dureza vickers ya que sus cargas varían de 5 a 125 kilopondios, La normatividad que se utiliza para la realización de este ensayo es la ASTM-E92-82 (Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials) y ASTM 384-99 (Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials), Su penetrador es una pirámide de diamante con un ángulo base de 136° y no se lee directamente en la máquina, Para determinar el número de dureza se aplica la siguiente fórmula:

$$HV = \frac{2 \sin 68^\circ F}{d^2} \approx \frac{1,8544F}{d^2}$$

(Ecuación 3)

símbolo	nombre
HV	Dureza Vickers
d	media aritmética que resulta de ambas diagonales de la huella después de eliminada la carga, en mm
F	Fuerza aplicada sobre la pirámide penetradora (o indentador) kgf

Las variables esenciales que se deben tener en cuenta para el ensayo de dureza son la carga y el tiempo de exposición a la misma; la carga depende enteramente del equipo a utilizar, que en este caso es un durómetro HVRVU-187.5 localizado en el laboratorio de metalografía de la Universidad Francisco de Paula Santander figura 18 y el tiempo debe ser controlado por la persona que realiza el ensayo.



Figura 11. Durómetro

procedimiento	Temperatura	Carga aplicada	duración
ensayo	28°C	15 kgf	10s

Teniendo en cuenta la norma, se ajusta el equipo según sus características, asegurando que se aplique la carga indicada y el tiempo de duración correcto, las muestras deben estar pulidas, centradas y formando un ángulo de 90° entre la superficie y el indentador según lo dice la norma, de modo que la huella del indentador tenga la resolución adecuada para poder realizar su medición, que posteriormente se usa para determinar su dureza, midiendo las diagonales de la huella y aplicando la ecuación 3. Se realizaron en promedio un total de 4 repeticiones por muestra, los datos de cada repetición se encuentran en el anexo A, dado el número de datos se

calcula el valor promedio de las diagonales y de la dureza vickers, tabla 9, las muestras fueron medidas con el microscopio óptico Zeiss Axio Scope A1 y usando el programa AxioVision .

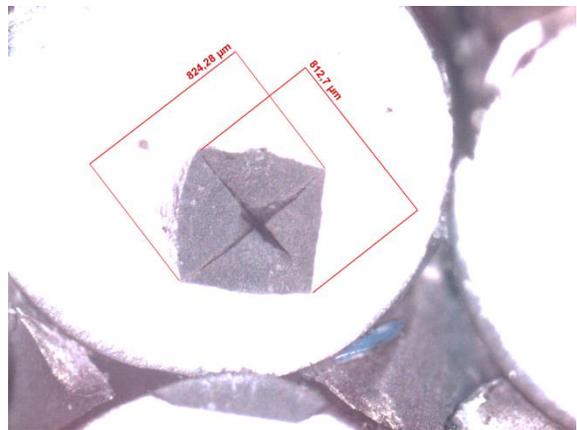


Figura 12. Huella y medición de las diagonales

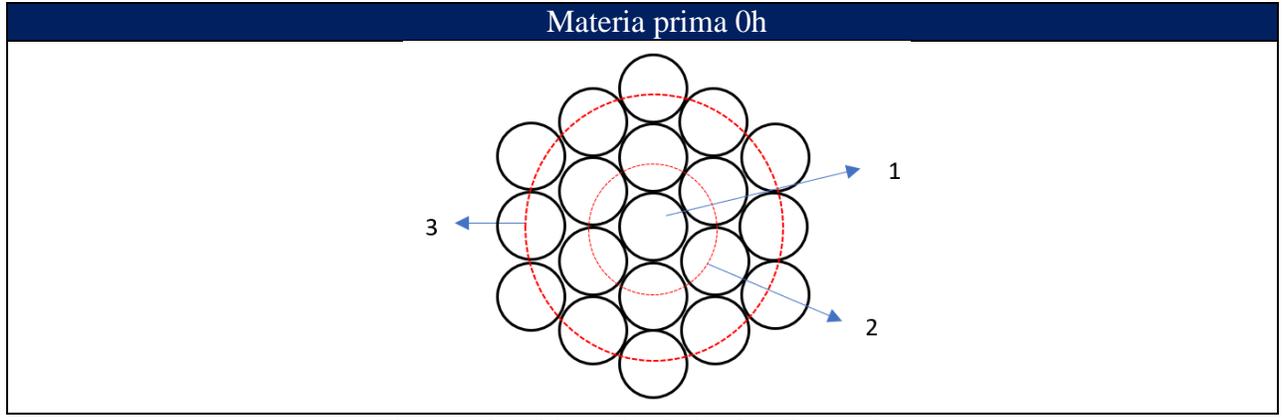


Figura 13. Ubicación de las huellas en la muestra

La figura 13 muestra la ubicación de los hilos en una muestra. Las mediciones se realizaron de manera que al menos se ensayara un hilo de cada uno de los tres círculos concéntricos.

. Tabla 9.Valores obtenidos de dureza vickers

Horas de criogenia	Valor promedio de diagonal 10	Valor promedio de HV
0	863	43
16	852	41
24	799	48
48	902	40
72	858	40
120	885	38
168	891	39

La tabla 10 muestra un análisis estadístico de los valores obtenidos de las diagonales de la huella así como del valor de la dureza vickers, en la cual se pueden comparar y determinar la variación de la dureza de acuerdo a los diferentes tiempos de tratamiento criogénico.

Tabla 10. Análisis estadístico de la dureza

HV	HORAS DE CRIOGENIA						
	0	16	24	48	72	120	168
media geometrica	40,7	41,0	46,9	37,5	40,3	37,9	37,9
mediana	37,4	40,3	42,9	35,6	39,3	38,0	38,7
desviacion estandar	14,8	6,2	11,5	16,1	1,9	3,3	9,7
coeficiente de variacion	40%	15%	27%	45%	5%	9%	25%
promedio	42,6	41,4	47,8	39,8	40,3	38,0	38,8
promedio + des.estandar	57,4	47,6	59,3	55,9	42,3	41,4	48,5
promedio- des.estandar	27,8	35,2	36,3	23,7	38,4	34,7	29,1

La tabla anterior es la aplicación de medidas de tendencia central a los datos obtenidos de dureza en las muestras, para cada uno de los tiempos y de los valores promedio de HV en cada una. El análisis de los resultados muestran que no hay una tendencia clara de la dureza respecto a la variable tiempo de criogenización, y solo hay un valor de 48 HV a las 24 horas de criogenia

que se puede considerar estadísticamente diferente al resto de valores. Sin embargo, se puede decir que el material luego del procesamiento de criogenización es más homogéneo en cuanto a dureza, puesto que los valores de desviación estándar y de coeficiente de variación son más bajos en las muestras tratadas que en la muestra sin tratamiento. Este es un dato no menor, puesto que en los materiales que son utilizados para la conducción eléctrica es de gran importancia su homogeneidad, y es de esperarse que una mayor homogeneidad en la dureza puede representar una mayor homogeneidad en el comportamiento eléctrico.

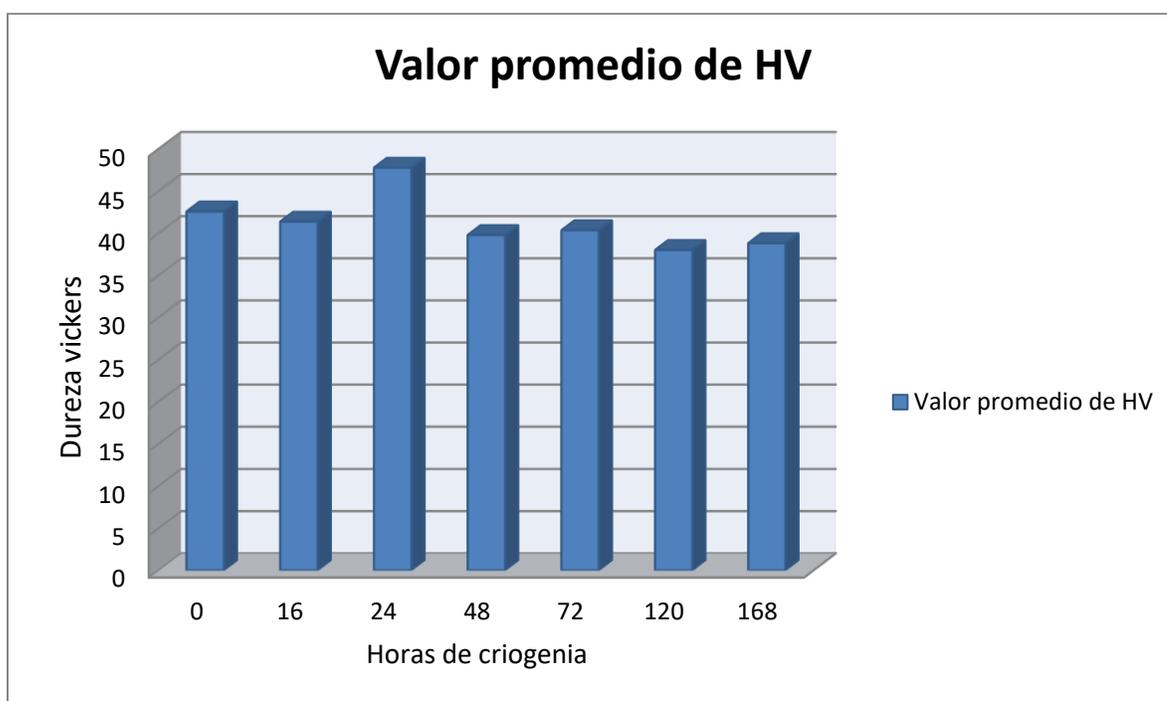


Figura 14. Diagrama de la variación de la dureza

En la figura 14, diagrama de barras, se puede hacer una diferenciación del comportamiento de la dureza del material con el tratamiento térmico criogénico, y determinar donde se obtuvo una mayor o menor dureza, en el cual se puede observar que el mayor pico de dureza se obtuvo en la muestra que se sometió a una exposición de tratamiento de 24 horas con

un valor de 48 HV , mientras que los otros se pueden considerar estadísticamente iguales. Al analizar estos datos, resultan muy similares a los obtenidos en el trabajo realizado por (Vargas Lozano & Sierra Gonzales, 2016) en su proyecto, en el cual aplican un tratamiento criogénico al aluminio 2024-T4, que es un aluminio aleado y tratado térmicamente, en este trabajo o obtuvieron como resultado, que en todos los intervalos de tiempo a excepción del de 24 horas los resultados no varían considerablemente, por esta razón se atribuye que hay homogeneidad en la superficie y en los granos formados. También es preciso resaltar que al comparar el resultado obtenido en el trabajo de (Gomez Gomez & Gamba Guerrero) donde obtuvieron un aumento de la dureza vickers de 3,38% para 30 min de tratamiento, con los valores que resultaron en el presente trabajo, se observa que los valores más altos de dureza respecto al tiempo se obtienen en las primeras horas de aplicación del tratamiento criogénico, como en este caso, donde el mayor valor de dureza fue en las primeras 24 horas de criogenia.

6.0. Prueba conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad de un material de dejar pasar la corriente eléctrica a través de él, Con base a los conceptos vistos anteriormente se puede decir que existen dos formas de calcular la conductividad eléctrica, la primera conociendo la resistencia y resistividad del material y la segunda por medio de un circuito eléctrico en el cual se mide la caída de potencial y la corriente, en ambos casos conociendo las dimensiones del material. En este proyecto se usó el segundo método de los antes mencionados. Las siguientes ecuaciones son las utilizadas para deducir y calcular la conductividad eléctrica:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\rho = \frac{V \times A}{I \times L} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\sigma = \frac{I \times L}{V \times A} \quad \text{Ecuación 6}$$

V: diferencia de potencial (v)

I: intensidad de corriente (a)

A: sección que atraviesa la corriente (m²)

L: longitud que atraviesa la corriente en (m)

σ : conductividad eléctrica (Ω.m)⁻¹ o (s/m)

Dado que la fórmula de la resistividad implica la resistencia (ecuación 2) y la resistencia está dada por la ecuación 1, obtenemos la ecuación 3 y ya que la conductividad es la inversa de la resistividad deducimos la ecuación 6.

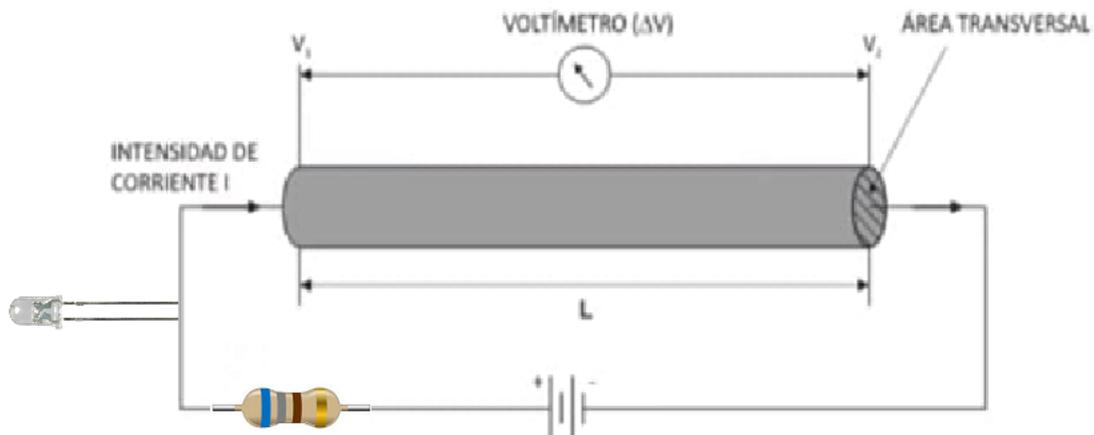


Figura 15. Representación esquemática de ensayo de conductividad

La figura 15 es una representación esquemática del ensayo realizado, del cual se obtienen las variables necesarias para calcular la conductividad eléctrica, se utilizó una fuente que proporciona 5,35 V y un flujo de corriente de 3,54 mA, a su vez conectado de la muestra de aluminio de la cual se extrajo un solo hilo para hacer la prueba y de esta manera cerrar el circuito en serie.



Figura 16. Multímetro digital

Para hacer la medición del voltaje, la corriente y cada una de las caídas de potencial se usó un multímetro digital V-redline figura 22. Las características de la muestra, Cables concéntricos de aluminio 1350, AAC.Cubierta con XLPE se muestran en el anexo B, del cual obtenemos el diámetro de hilo 1,89 mm y la longitud de 15mm que es la longitud a la que se cortaron las muestras.

$$\sigma = \frac{(3,54 \cdot 10^{-3} \times 1,5 \cdot 10^{-2})}{(7,41 \cdot 10^{-7} \times 2,8 \cdot 10^{-6})} = 2,55 \cdot 10^7$$

Reemplazando los valores y constantes del circuito se obtuvo el valor de la conductividad y posteriormente se tabularon en la tabla 11.

Tabla 11. ensayo de conductividad

horas de criogenia	numero de muestra	longitud (L)	diametro	area transversal (A)	corriente (I)	diferencia de potencial	conductividad
		m	m	m2	A	v	($\Omega \cdot m$)-1 o (s/m)
0	x	1,50E-02	1,89E-03	2,81E-06	3,54E-03	7,41E-07	2,55E+07
16	1	1,5E-02	1,9E-03	2,80552E-06	3,5E-03	7,41E-07	2,55E+07
24	2	1,5E-02	1,9E-03	2,80552E-06	3,5E-03	7,41E-07	2,55E+07
48	3	1,5E-02	1,9E-03	2,80552E-06	3,5E-03	7,41E-07	2,55E+07
72	4	1,5E-02	1,9E-03	2,80552E-06	3,5E-03	7,41E-07	2,55E+07
120	5	1,5E-02	1,9E-03	2,80552E-06	3,5E-03	7,41E-07	2,55E+07
168	6	1,5E-02	1,9E-03	2,80552E-06	3,5E-03	7,41E-07	2,55E+07

La En la tabla 11 se puede apreciar los valores obtenidos durante el ensayo de conductividad para cada una de las muestras de acuerdo a los diferentes tiempos de criogenia. La caída de potencial medida fue de 2.0×10^{-4} ($\Omega \cdot m$)-1, restando las pérdidas relacionadas con el equipo y las conexiones (cuyo valor aproximado es de $1,99259 \times 10^{-4}$) la caída de potencial de potencial calculada es $7,41 \times 10^{-7}$.

El aluminio tiene un valor promedio de conductividad de $37,8 \times 10^6$ ($\Omega \cdot m$)-1 (Electonica , 2021), si comparamos este valor con el resultado obtenido en los cálculos y mediciones se observa que la conductividad medida resultó un 33% menor al valor de conductividad de referencia. Cabe resaltar y Es evidente que las muestras tratadas criogénicamente no presentaron ninguna variación de los valores de conductividad con respecto a la materia prima inicial.

7. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

- La microestructura de las muestras presenta una sola fase con alta presencia de puntos oscuros que probablemente son inclusiones, puesto que es muy poco probable la presencia de porosidades por la forma de obtención de los alambres. Para determinar la composición de las porosidades se hace necesario el uso de un microscopio electrónico de barrido, pero que no se consideró necesario dentro de los objetivos del proyecto.
- La dureza de los materiales tratados con el proceso de criogenia no tiene una tendencia clara respecto al tiempo de criogenización. Sin embargo, se obtuvo una muestra con un valor significativamente diferente al resto en la muestra tratada en el nitrógeno líquido por 24 horas, y logrando un aumento de 11,6% respecto a la muestra sin tratamiento.
- Al comparar el resultado obtenido en el trabajo de (Gomez Gomez & Gamba Guerrero) con los valores que resultaron en el presente trabajo, se observa que los valores más altos de dureza respecto al tiempo se obtienen en las primeras horas de aplicación del tratamiento criogénico.
- En los resultados también se puede observar que a excepción del valor obtenido a las 24 horas de criogenización, los demás valores de dureza para los diferentes tiempos de criogenización no reflejan un aumento apreciable en el valor de la dureza vickers, por el contrario se observa una pequeña disminución después de alcanzado el tiempo de 24 horas.
- El análisis estadístico del tratamiento criogénico evidenció que el material tiene una mayor homogeneidad en cuanto a dureza de los hilos de cada muestra, en comparación con la muestra sin tratamiento criogénico.

- Los valores obtenidos de la conductividad, según los cálculos y mediciones, se observa que la conductividad medida resultó un 33% menor al valor de conductividad de referencia
- El material no presenta cambios apreciables en las mediciones de conductividad, dadas las condiciones del circuito se observó que no hubo una variación entre cada una de las muestras expuestas a tratamientos y la muestra original sin tratamiento.

RECOMENDACIONES

- Lo que respecta a la dureza se recomienda incrementar las horas de tratamiento criogénico con el fin de analizar la influencia del tratamiento criogénico para disminuir la resistencia y la dureza del material con el fin de obtener un tratamiento similar o que reemplace al revenido utilizado como tratamiento térmico convencional.
- Es recomendable usar un equipo especializado para medir conductividad eléctrica, con una mayor sensibilidad, con el fin de poder apreciar variaciones más pequeñas de conductividad en el material, que no hayan podido ser determinadas con el método usado en este proyecto.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de dureza vickers en muestras de cable ACC de aluminio 1350 H-19

ENSAYO DE DUREZA VICKERS							
Horas de criogenia	# de muestra	duracion (s)	# de huella	Valor de diagonal 1 (μm)	Valor diagonal 2 (μm)	carga aplicad (kgf)	HV
0	X	10	1	901	749	16	44
			2	807	745	16	49
		20	3	660,5	624,18	16	72
			4	1030	901	16	32
			5	1044	1037	16	27
			6	856,77	925,16	16	37
			7	926	873	16	37
168	M1	10	1	782,02	762	16	50
		20	2	927	948	16	34
			3	821	829	16	44
			4	1047	1008	16	28
120	M2	10	1	860	834	16	41
		20	2	938	912	16	35
			3	879,3	888	16	38
72	M3	10	1	805	933	16	39
		20	2	825	845	16	43
			3	828	912	16	39
48	M4	10	1	694	699	16	61
		20	2	856	801	16	43
			3	1155	949	16	27
			4	997	1065	16	28
24	M5	10	1	667	686	16	65
		20	2	893	821,2	16	40
			3	824	813	16	44
			4	850	839	16	42
16	M6	10	1	816	831	16	44
		20	2	792	814	16	46
			3	932	927	16	34

Anexo 2. Especificaciones técnicas de la materia prima (General Cable, 2015)



LW

Aplicaciones:

Se usa en líneas aéreas de distribución.

Construcción:

Cables concéntricos de aluminio 1350, AAC. Cubierta con XLPE.

Características:

- Temperatura máxima de operación: 90 °C del conductor cubierto con XLPE.
- Recubrimiento color negro, resistente a los efectos del clima y los rayos solares.

Normas:

- ICEA S 70-547

Conducto



Nombre clave	Calibre AWG or kcmil	Construcción		Espesor de aislamiento		Diámetro exterior		Masa total		Carga a la rotura		Capacidad de corriente			
		Nº hilos	Diámetro de cada hilo		mm	mils	mm	in	kg/km	lb/kft	kgf	kips	75 °C	80 °C	90 °C
			mm	mils									A*	A*	A*
Plum	6	7	1,55	61,2	0,76	30	6,1	0,241	51,3	34,5	230	0,507	95	101	111
Apricot	4	7	1,96	77,2	0,76	30	7,3	0,287	77,1	51,8	360	0,793	120	127	140
Peach	2	7	2,47	97,4	1,14	45	9,6	0,377	128	85,8	552	1,22	161	171	188
Nectarine	1	7	2,78	109,5	1,14	45	10,5	0,412	157	105	671	1,48	189	200	220
Quince	1/0	7	3,12	122,8	1,52	60	12,2	0,482	206	138	813	1,79	218	231	254
Haw	1/0	19	1,89	74,5	1,52	60	12,3	0,486	203	136	880	1,94	218	231	254
Orange	2/0	7	3,50	137,8	1,52	60	13,4	0,525	252	169	1023	2,25	253	268	295
Ironwood	2/0	19	2,13	83,7	1,52	60	13,5	0,530	248	167	1092	2,41	253	268	295
Fig	3/0	7	3,93	154,7	1,52	60	14,6	0,575	309	208	1238	2,73	294	312	343
Lemon	3/0	19	2,39	94,0	1,52	60	14,7	0,580	304	204	1352	2,98	294	312	343
Olive	4/0	7	4,42	174,0	1,52	60	16,0	0,631	382	256	1566	3,45	343	364	401
Pomegranate	4/0	19	2,68	105,5	1,52	60	16,4	0,636	374	251	1640	3,61	343	364	401
Mulberry	266,8	19	3,01	118,5	1,52	60	18,8	0,739	489	328	2029	4,47	399	423	465
Silverbelt	266,8	19	3,01	118,5	2,03	80	18,8	0,739	489	328	2029	4,47	398	423	465
Anona	336,4	19	3,38	133,1	1,52	60	19,6	0,770	571	384	2508	5,53	464	492	541
Molles	397,5	19	3,68	144,9	2,03	80	22,0	0,867	700	470	2914	6,42	517	548	603
Citron	477	19	4,02	158,3	2,03	80	23,7	0,932	822	552	3406	7,51	582	617	679
Huckleberry	477	37	2,88	113,4	2,03	80	23,7	0,935	815	547	3539	7,80	582	617	679
Paw Paw	556,5	37	3,11	122,4	2,03	80	25,3	0,996	937	630	4046	8,92	643	682	750
Breadfruit	636	61	2,59	102,0	2,41	95	27,6	1,090	1086	730	4759	10,49	702	744	819
Grapefruit	1033,5	61	3,31	130,3	2,41	95	33,9	1,330	1704	1145	7473	16,48	959	1017	1119

* Capacidad de corriente permitida en conductores monopolares cubiertos, instalados al aire libre, temperatura en el conductor 75 °C, 80 °C ó 90 °C, temperatura ambiente de 40 °C.

Nota: La información que corresponde al conductor se encuentra en la referencia AAC.

Bibliografía

- Biblioteca universitaria de alcala . (2019). *fuentes de informacion* . Obtenido de http://www3.uah.es/bibliotecaformacion/BPOL/FUENTESDEINFORMACION/tipos_de_fuentes_de_informacin.html
- Álava , l. a. (2012). *Tratamientos criogénicos: una tecnología con excelentes resultados en la estabilidad dimensional de utillajes y componentes*. Obtenido de <http://azterlan.blogspot.com/2012/10/tratamientos-criogenicos-una-tecnologia.html>
- cimiano, G. (2002). *introduccion a los tratamientos termicos* . Obtenido de <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/2506-Introduccion-a-los-tratamientos-termicos.html>
- COGOLLO, J. L. (s.f.). MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALUMINIO UNS .
- concepto de. (2019). *conductividad electrica*. Obtenido de <https://concepto.de/conductividad-electrica/>
- de la osada, p. m. (2017). *slideshare*. Obtenido de aluminio y sus aleaciones aplicaciones en el sector electronico-electronico: <https://es.slideshare.net/PericoClemente/aluminio-y-sus-aleaciones-aplicaciones-en-el-sector-elctricoelectronico-clemente-de-la-osada>
- Ecured. (2019). *aluminio*. Obtenido de <https://www.ecured.cu/Aluminio>
- Ecured. (2019). *austenita*. Obtenido de <https://www.ecured.cu/Austenita>

Ecured. (2019). *bronce*. Obtenido de <https://www.ecured.cu/Bronce>

Ecured. (2019). *cobre*. Obtenido de <https://www.ecured.cu/Cobre>

Electronica . (21 de agosto de 2021). *electronica facil*. Recuperado el 2021, de <https://mielelectronicafacil.com/electronica-basica/conductividad-electrica/#tabla-de-conductividad-electrica>

Elhuyar. (2014). *El tratamiento termico mejora las prestaciones y reduce los costes de los materiales*. Obtenido de <https://www.spri.eus/euskadinnova/es/innovacion-tecnologica/noticias/tratamiento-criogenico-mejora-prestaciones-reduce-costes-materiales/11534.aspx>

General Cable. (2015). Catálogo de Productos. *Catálogo de Productos*.

general cables. (mayo de 2018). *catalogo*. Recuperado el octubre de 2020, de catalogo: <https://www.nalelectricos.com.co/archivos/catalogo-procables.pdf>

Gomez Gomez, J. A., & Gamba Guerrero, B. C. (s.f.). Recuperado el 2020, de Library: <https://library.co/title/influencia-tratamiento-termico-resistencia-corrosion-microestructura-aleacion-aluminio>

Leonel salazar, K. M. (2020). Evaluación de la influencia del tiempo de recocido sobre las propiedades mecánicas, eléctricas y microestructurales de la aleación de aluminio AA-8176. *Revista ingenieria UC*, 102-114.

matalmecanica. (2002). *introduccion a los tratamientos termicos*. Obtenido de <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/2506-Introduccion-a-los-tratamientos-termicos.html>

Posso, C., & Giraldo, G. (2017). *Influencia de los tratamientos térmicos criogénicos en la dureza y resistencia al desgaste en aceros HSS (jaguar HSS 3/8x3”)*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/b>

Qinghai guoxin aluminum industry incorporated co.ltd. (2019). *Aleación de aluminio serie 1000* . Obtenido de Qinghai guoxin aluminum industry incorporated co.ltd, [201http://gx-aluminioperfile.com/5-aluminum-magnesium-alloy/](http://gx-aluminioperfile.com/5-aluminum-magnesium-alloy/)

QuimiNet. (2011). *Aplicaciones y Usos del Aluminio*. Obtenido de Recuperado de <https://www.quiminet.com/articulos/aplicaciones-y-usos-del-aluminio-54823.htm>

SIGNI. (2019). *Barras de aluminio* . Obtenido de . Recuperado de <http://www.signaluminio.com/perfil-aluminio/barras-en-aluminio/1350-Barra-plana-de-aluminio-1350.html>

Univercidad Autonoma Del Estado De Hidalgo. (25 de junio de 2020). *Asignatura: EstadísticaTema: Coeficiente de Variación*. Obtenido de Asignatura: EstadísticaTema: Coeficiente de Variación: https://www.uaeh.edu.mx/division_academica/educacion-media/repositorio/2010/6- semestre/estadistica/coeficiente-de-variacion.pdf

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO FACULTAD DE CIENCIAS

ADMINISTRATIVAS. (junio de 2012). *Capítulo6:DESVIACIÓNESTÁNDAR*.

Obtenido de Capítulo6:DESVIACIÓNESTÁNDAR:

https://unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/IF_JUNIO_2012/IF_CALDERON%20OTOYA_FCA/capitulo%206%20y%207.pdf

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO FACULTAD DE CIENCIAS

ADMINISTRATIVAS. (junio de 2012). *MEDIDAS DECENTRALIZACION*.

Obtenido de

https://unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/IF_JUNIO_2012/IF_CALDERON%20OTOYA_FCA/capitulo%203.pdf

Universitat Politècnica de València - UPV. (2021). Ensayo de conductividad eléctrica | 91/93

| UPV. *Ensayo de conductividad eléctrica | 91/93 | UPV*.

UNMSM. (2011). *glosario*. Recuperado el 2021, de ATENEO Repositorio De Libros

Digitales: [https://www.google.com/search?client=firefox-b-](https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&sxsrf=ALeKk02dE3FtswriOuasPFivFvjgnmXEaw%3A1627307992656&lei=2L_-YMXPJ4WVwbkPsci8-A8&q=dendrita%20cristalograf%C3%ADa&ved=2ahUKEwjFm97W8oDyAhWFSjABHTEkD_8QsKwBKAN6BAg0EAQ&biw=1280&bih=647)

[d&sxsrf=ALeKk02dE3FtswriOuasPFivFvjgnmXEaw%3A1627307992656&lei=2L_-](https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&sxsrf=ALeKk02dE3FtswriOuasPFivFvjgnmXEaw%3A1627307992656&lei=2L_-YMXPJ4WVwbkPsci8-A8&q=dendrita%20cristalograf%C3%ADa&ved=2ahUKEwjFm97W8oDyAhWFSjABHTEkD_8QsKwBKAN6BAg0EAQ&biw=1280&bih=647)

[YMXPJ4WVwbkPsci8-](https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&sxsrf=ALeKk02dE3FtswriOuasPFivFvjgnmXEaw%3A1627307992656&lei=2L_-YMXPJ4WVwbkPsci8-A8&q=dendrita%20cristalograf%C3%ADa&ved=2ahUKEwjFm97W8oDyAhWFSjABHTEkD_8QsKwBKAN6BAg0EAQ&biw=1280&bih=647)

[A8&q=dendrita%20cristalograf%C3%ADa&ved=2ahUKEwjFm97W8oDyAhWFSjA](https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&sxsrf=ALeKk02dE3FtswriOuasPFivFvjgnmXEaw%3A1627307992656&lei=2L_-YMXPJ4WVwbkPsci8-A8&q=dendrita%20cristalograf%C3%ADa&ved=2ahUKEwjFm97W8oDyAhWFSjABHTEkD_8QsKwBKAN6BAg0EAQ&biw=1280&bih=647)

[BHTEkD_8QsKwBKAN6BAg0EAQ&biw=1280&bih=647](https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&sxsrf=ALeKk02dE3FtswriOuasPFivFvjgnmXEaw%3A1627307992656&lei=2L_-YMXPJ4WVwbkPsci8-A8&q=dendrita%20cristalograf%C3%ADa&ved=2ahUKEwjFm97W8oDyAhWFSjABHTEkD_8QsKwBKAN6BAg0EAQ&biw=1280&bih=647)

Vargas Lozano, H., & Sierra Gonzales, K. (2016). *Influencia del tratamiento térmico de*

homogenizado y reenviejado seguido de un tratamiento criogénico en la

microestructura y la dureza del aluminio 2024-t4. Obtenido de Recuperado de

[http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4194/1/influencia%20de%20la%20](http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4194/1/influencia%20de%20la%20criogenia%202024-T4%20%28corregido%29.pdf)

[criogenia%202024-T4%20%28corregido%29.pdf](http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4194/1/influencia%20de%20la%20criogenia%202024-T4%20%28corregido%29.pdf)

Zúñiga, M. A. (2012). RECONOCIMIENTO DE FASES EN ALEACIONES DE

ALUMINIO EN ESTADO MODELADO. pág. 124.