Evaluation of the influence of annealing time on the mechanical, electrical and microstructural properties of aluminum alloy AA-8176

Leonel Salazar [a], Kelvyn Matute [a], Luís Sidorovas *[,b]

[a]Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.
[b]Centro de Investigación de Materiales CIM, Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.- Aluminum, an excellent material for electrical applications (almost all high voltage wiring is made from aluminum alloys). It has a high relationship between resistance and weight, corrosion resistance, high electrical conductivity, reflectivity, formability, machinability, non-toxic, and non-magnetic. Due to the current circumstances (Venezuela Country Situation), it is not possible to import raw materials for the manufacture of high quality electrical conductors; therefore it is obtained from a national but lower quality aluminum supplier. A large number of imperfections were observed: metallic (Fe) and non-metallic inclusions (Al_2O_3, SiO_2, $CaCO_3$ and Si), porosities that affect quality, then it is melted and add alloying elements to obtain an alloy adjusted to the quality specifications for the manufacture of electrical conductors. The experimental procedures were carried out according to ASTM B 800-05 and ASTM B standards for the evaluation of annealing on mechanical, electrical and microstructural properties. The material after each annealing time (6, 8, 10 and 12 hours) was characterized, through mechanical and metallographic tests, to determine the influence of the annealing time on the alloy. The longer the annealing, the material became more ductile and its grain size increases. It was established that the alloy must be better refined to obtain a better final product.

Keywords: microstructure; annealing; ultimate effort; elongation; electrical conductivity.

Evaluación de la influencia del tiempo de recocido sobre las propiedades mecánicas, eléctricas y microestructurales de la aleación de aluminio AA-8176

Resumen.- El aluminio, excelente para aplicaciones eléctricas (casi todo el cableado de alto voltaje se fabrica con aleaciones de aluminio), posee una alta relación entre la resistencia y el peso, resistencia a la corrosión, elevada conductividad eléctrica, reflectividad, formabilidad, maquinabilidad, no-tóxico, ni-magnético. Debido a las actuales circunstancias (Situación País Venezuela), no es posible la importación de materia prima en bobinas de alambrón de diámetro d= 9,5 mm para la fabricación de conductores eléctricos de alta calidad, por lo tanto se obtiene de un proveedor nacional la aleación de aluminio AA 8176 en lingotes, pero con una gran cantidad de imperfecciones: inclusiones metálicas (Fe) y no metálicas (Al_2O_3, SiO_2, $CaCO_3$ y Si), y porosidades que afectan la calidad, luego se funde y se le agregan elementos aleantes para obtener una aleación según las normas de fabricación de conductores eléctricos, con una menor cantidad de imperfecciones, inclusiones y porosidad. A continuación se procesa por deformación plástica y se presenta en rollos de alambrón de 9,5 mm de diámetro y al final se le aplica el recocido de 6, 8,10 y 12 horas y se caracterizó mediante ensayos mecánicos y metalográficos, para determinar la influencia del tiempo del recocido sobre la aleación. A mayor tiempo del recocido el material se hizo hasta un 30 por ciento más dúctil y un crecimiento del tamaño de grano de 30 μm hasta 200 μm para el recocido de 12 horas. Se estableció que debe refinarse mejor la aleación para obtener un mejor producto final.

Palabras clave: microestructura; recocido; esfuerzo ultimo; elongación; conductividad eléctrica.

Recibido: 10 de febrero, 2020.
Aceptado: 10 de abril, 2020.

1. Introducción

Las propiedades que favorecen la selección del aluminio y sus aleaciones son su alta relación entre la resistencia y su peso, su alta resistencia a la corrosión de productos químicos, su elevada conductividad eléctrica, reflectividad,

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*lsidorovas@gmail.com (L. Sidorovas)

formabilidad y maquinabilidad, además no son magnéticos ni tóxicos. Los usos principales del aluminio y de sus aleaciones son la fabricación de contenedores y empaques (latas y hojas de aluminio), edificios y otros tipos de construcciones, en el transporte, herramientas portátiles, productos duraderos y aplicaciones eléctricas (conductor económico y no magnético). Casi todo el cableado para transmisión de alto voltaje se fabrica con aluminio [1].

Según Fernández [2] el aluminio y sus aleaciones solo pesan aproximadamente un tercio de volúmenes iguales del hierro, acero o cobre. Con temples apropiados, algunas aleaciones de aluminio igualan o superan la resistencia de algunos aceros. Las aleaciones de aluminio fuerte pueden ser más resistentes que el acero. Del mismo modo Espinoza [3] afirma que el peso tiene mucha importancia en la transmisión de electricidad de alto voltaje a larga distancia, y actualmente se usan conductores de aluminio para transmitir electricidad a potenciales de 700.000 voltios. La producción de cables y alambres a partir de la aleación de aluminio AA-8176, se fundamenta en estándares de calidad: conductividad eléctrica, resistencia a la tensión y porcentaje de alargamiento). Para minimizar la variación en las especificaciones se le aplica un tratamiento térmico de recocido que mejora sus propiedades mecánicas y eléctricas.

La resistencia a la tensión es el esfuerzo ingenieril calculado cuando la carga aplicada alcanza su valor máximo, también se le denomina última resistencia a la tensión (TS) y junto con la fluencia son dos importantes propiedades para el diseño y la manufactura de los materiales. El porcentaje de alargamiento se relaciona con la deformación que sufre el material antes de fallar. Groover [4] lo define como la cantidad de deformación que el material puede soportar antes de romperse, es también una propiedad mecánica de interés en muchos procesos de manufactura. La medida común de esta propiedad es la ductilidad, que es la capacidad de un material para deformarse plásticamente sin fracturarse. Esta medida puede tomarse ya sea como elongación o como reducción de área.

Como lo enseña Callister [5] en relación a la conductividad eléctrica, este término se utiliza para especificar el carácter eléctrico de un material. Es simplemente el recíproco de la resistividad, indica la facilidad con que un material es capaz de conducir corriente eléctrica. Por otro lado la norma Covenin 452-89 [6] indica que la Resistividad es el valor que expresa el producto de la resistencia eléctrica de un material metálico por su sección transversal, dividido entre su longitud. Así como también, la resistividad volumétrica es el valor que expresa el producto de su resistencia eléctrica por su sección divido entre su longitud y, finalmente la resistividad de masa es el producto de la resistividad volumétrica por la densidad del metal.

Destaca Fernández [2] que el aluminio es un gran sustituto como conductor en reemplazo del cobre, por las características que presenta y además representa un negocio rentable, también determinó en su estudio que las aleaciones tipo 1350 y la serie 8000 son las que poseen mejor conductividad, por esto son las más idóneas para la fabricación de conductores de aluminio de hasta 2000 voltios. Tal vez por estas razones se ha incrementado tanto la fabricación de conductores eléctricos a base de la aleación de aluminio AA-8176.

Mangonon [7] define el recocido como un tratamiento térmico del material con el propósito de aliviar los esfuerzos después del trabajo en frío o en caliente, y para ablandar el material al eliminar el endurecimiento por deformación. La recuperación se aplica para producir alambres de aluminio de alta resistencia para líneas de transmisión eléctrica. La recuperación devuelve la conductividad eléctrica, pero conserva la alta resistencia mecánica que se obtuvo en el trabajo en frío.

La presente investigación se realizó con la finalidad de mejorar la calidad de los conductores eléctricos fabricados con la aleación de aluminio AA-8176, donde se evaluó el efecto del tiempo del tratamiento térmico de recocido, para garantizar las propiedades eléctricas y mecánicas. Los resultados permitieron interpretar, discutir y analizar los datos obtenidos para establecer un tiempo de recocido que permita alcanzar la especificación de la norma ASTM B 800-05 y con el mejor tiempo de recocido, mejorar el proceso de fabricación y disminuir los costos implícitos de producción. Esto permitirá

la fabricación de los conductores eléctricos con un alto estándar de calidad con la materia prima que se consigue en el ámbito nacional, esto incide en la utilidad económica de la empresa y en la política de sustitución de importaciones de materia prima (aleación de aluminio) con lo cual la empresa se posiciona mejor en el mercado nacional e internacional de los productores de conductores eléctricos de esta aleación de aluminio.

2. Desarrollo de la investigación

La investigación se inicia con una revisión de los fundamentos teóricos que guían este proceso. A continuación se desarrollan las siguientes etapas: adquisición, reformulación y estudio de recocido del material utilizado en la producción de conductores eléctricos.

2.1. Adquisición del material

Como consecuencia de múltiples factores que interactúan entre ellos, como la disponibilidad de dólares para comprar la materia prima importada, asimismo la eficiencia administrativa del Estado y hasta un pretendido bloqueo económico que se enmarcan en la realidad país actual, no se puede obtener la materia prima importada, por lo tanto la empresa se ve en la necesidad de adquirirla de un proveedor nacional, esta aleación es usada para múltiples aplicaciones. El material llega a la empresa en forma de lingotes de aleación de aluminio AA-8176, pero con una gran cantidad de imperfecciones: inclusiones metálicas y no metálicas e impurezas no deseadas, por lo que se funde para ser reformulada para obtener una aleación ajustada para la fabricación de conductores eléctricos.

2.2. Reformulación del Material

El proceso de producción de conductores eléctricos comienza cuando se recibe la materia prima original según el certificado de calidad. Esta es fundida y se le adicionan algunos elementos aleantes como: chatarra (recortes, escoria, producto rechazado, entre otros) y aleantes (boro, hierro, magnesio, silicio, entre otros), esto se justifica porque la materia prima de una calidad limitada debe ser refinada para disminuir el porcentaje de impurezas, porosidades, imperfecciones mecánicas y no mecánicas con el objetivo de obtener una aleación con una formulación propia de calidad mejorada, reformulándola hasta obtener una aleación de aluminio AA-8176 ajustada a los parámetros de la empresa dentro de las especificaciones nacionales e internacionales.

Posteriormente a esta reformulación el material pasa por un proceso de colada continua para después realizar un proceso de fabricación (deformación plástica), donde la barra de aluminio entra con una sección trapezoidal al laminador, pasando por 10 estaciones de laminación en caliente (5 horizontales y 5 verticales) con un baño de trefilina con una concentración mayor al diez por ciento, saliendo con sección circular para luego pasar por un túnel de enfriamiento con agua y aire donde al final el recogedor se encarga de enrollar el alambrón formando la bobina de material, que se presenta en forma de rollo de alambrón con un diámetro de 9,5 mm, en bobinas de 2 toneladas y una densidad a 20 °C de 2,71 g/cm³ (Figura 1).

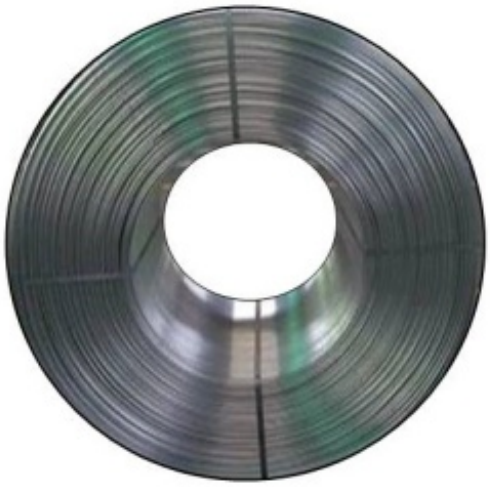


Figura 1: Presentación de alambrón de aluminio AA-8176.

En esta fase, al material sin tratamiento térmico de recocido, se le toma la muestra de la punta interna (PI) al inicio del rollo de alambrón y de punta externa (PE) al final del rollo, con una longitud de 35 cm para asegurar que la sección medida entre las mordazas para las muestras sea de

25 ± 1 cm para obtener las propiedades mecánicas (carga de rotura y porcentaje de alargamiento). A continuación se fabricaron las probetas para la aleación AA-8176 en su estado original (Sin tratamiento Térmico de Revenido) para los ensayos de conductividad eléctrica, esfuerzo y elongación según las especificaciones.

Se fabricaron las probetas en su condición inicial para el ensayo de tracción y de resistencia eléctrica, para la medición del diámetro de la probeta de tracción (9,5 mm) se utilizó un tornillo micrométrico digital Marca: Mitutoyo. Modelo: TM-500. Las probetas para los ensayos se pesaron en una balanza digital, marca: FAIRBANKS, modelo: FLM 0402, Capacidad: 5 kg. Apreciación de 0.001g. A continuación con estos datos se realizaron los cálculos pertinentes. La resistencia eléctrica se midió en un puente Kelvin (Figura 2).

Figura 2: Puente Kelvin Marca: Aesa Cortaillod, Modelo 7106.

Luego mediante el ensayo de tracción según la norma ASTM B 557 [8], en una máquina universal de tracción marca: YUE HUA TEC, modelo YH (Figura 3), previamente se determina el diámetro promedio según procedimiento interno. Del mismo modo se tomaron las muestras del material no tratado para determinar las propiedades eléctricas (conductividad o porcentaje de IACS) según el procedimiento interno de la empresa fundamentado en las Normas ASTM B 557 y B193-02 [9], que consiste en tomar una muestra con una longitud de 156 ± 1 cm para ser montada en un equipo puente de Kelvin marca: AESA CORTAILLOD, modelo 7106 (Figura 2)

La composición química de la aleación aluminio AA-8176 se obtuvo mediante un espectrómetro marca: SPECTROLAB, modelo: M6375 (Figura 4), tipo emisiones ópticas, programa: software

Figura 3: Máquina universal de tracción marca: YUE HUA TEC, modelo YH.

1.20, este equipo permite obtener el porcentaje en masa de cada uno de los metales presentes.

Figura 4: Equipo de espectrometría de emisiones óptica Spectrolab.

Se asume el aluminio AA-8176 como un material homogéneo en toda la longitud del

rollo de alambrón que se somete al tratamiento térmico de recocido, donde los resultados de sus características: esfuerzo último, elongación y conductividad eléctrica entre las muestras de la punta externa (PE) y la punta interna (PI) presentan una leve variación en los valores, se puede considerar que el material es uniforme.

2.3. Estudio de Recocido

El material se somete a un tratamiento térmico de recocido para garantizar los estándares de calidad del producto nacional y de exportación. Las especificaciones del aluminio AA-8176 se muestran en las Tablas 1, 2, 3 y 4. El tratamiento consistió en colocar cuatro bobinas del material dentro de un horno Marca: CANEFCO. Modelo: 3 a una temperatura entre los 500-520 °C, donde se realizó el tratamiento térmico de recocido con periodos de tiempo correspondientes a 6, 8, 10 y 12 horas respectivamente; después del recocido se tomaron las muestras en cada uno de los rollos para ser caracterizadas y determinar las propiedades mecánicas y eléctricas en sus diferentes tiempos de recocido.

Tabla 1: Composición química de la aleación de aluminio AA-8176 [8].

Material	Porcentaje en peso
Silicio	0,03 – 0,15
Hierro	0,40 – 1,0
Cobre	-
Magnesio	-
Zinc	0,10
Boro	-
Otros elementos	0,15
Aluminio	Resto

Tabla 2: Propiedades atómicas del aluminio [10, 9].

Número atómico	13,0000
Estructura cristalina	FCC
Peso atómico	26,9815 g/mol
Valencias indicadas	3,0000

Se asumen las especificaciones de calidad del producto de la empresa fabricante de conductores

Tabla 3: Propiedades Eléctricas [11].

Conductividad Eléctrica a 20 °C	35 m Ω^{-1} mm^{-2}
Resistividad eléctrica a 20 °C	0,0286 $\mu\Omega$ mm^2 m^{-1}
Coeficiente de temperatura de la resistencia eléctrica entre 1 y 100 °C	0,0040 K^{-1}
Densidad de corriente límite	102 A/mm²
Densidad de corriente de fusión	1910 A/mm²
Densidad del Al	2,7 g/cm^3

Tabla 4: Propiedades Mecánicas Promedios [12].

Módulo de Elasticidad (E)	71,7 GPa
Módulo de Rigidez (G)	26,8 GPa
Razón de Poisson (ν)	0,34

eléctricos por ser las características que definen el producto a partir del aluminio AA-8176. Los criterios de calidad del producto se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Criterios de calidad del producto.

	Diámetro (mm)	Conductividad eléctrica. (%IACS)	Esfuerzo último (kgf/mm^2)
Antes	9,5 ± 0,5	N/A	10 – 12
Despues	9,5 ± 0,5	60,6 Mínimo	6,0 – 8,5
Exportación	9,5 ± 0,5	> 60	6,0 – 9,0

2.3.1. Microscopia óptica y electrónica de barrido

La Microscopia Óptica y Electrónica de Barrido fue realizada en el Laboratorio de Metalografía de la Universidad Simón Bolívar (USB), los procedimientos para la preparación de las probetas como desbaste, pulido y ataque se realizaron según las normas ASTM E3-01 [13] y ASTM E 407-07 [14]. Se dispusieron las muestras y estas fueron embutidas en baquelita para el ensayo de metalografía. Para el desbaste grueso de las

probetas se utilizó una desbastadora gruesa marca: LECO, modelo: BG-30 con lija de banda de 80 grit y en el desbaste fino se procedió a lijar con desbastadora fina marca: LECO, modelo: DS-20 con lijas de: 240, 320, 400 y 600 grit. (Figura 5)

Desbaste grueso

Desbaste fino

Figura 5: Pulidora de desbaste.

Finalmente se le realizó un pulido tipo espejo con lija rotatoria (1200 grit), y un acabado con pasta de diamante (1 micrón) en una pulidora marca: BUEHLER, modelo: Beta - Twin Variable Speed Grinder Polisher. Como reactivo se usó ácido fluorhídrico al 24 por ciento durante 30 segundos de exposición.

Para el estudio de microscopia óptica, se utilizó un microscopio óptico marca: OLYMPUS, modelo: PMG3 y para la microscopia electrónica de barrido un microscopio electrónico de barrido Marca: JEOL, Modelo: JSM-6390, con ampliaciones desde 100X a 8000X (Figura 6).

Microscopio óptico

Microscopio electrónico de Barrido

Figura 6: Microscopio utilizados.

3. Análisis y discusión de los resultados

La composición química de la aleación aluminio AA-8176 reformulada sin procesar, se obtuvo mediante espectrometría de emisiones óptica en un equipo marca SPECTROLAB (Figura 4), arrojando los resultados, según Tabla 6.

Tabla 6: Composición química del aluminio AA-8176 (Colada 1098).

Porcentaje en peso				
Si	Fe	Cu	Mn	Mg
0,083	0,41	0,001	0,005	0,006
Ti+V	Ca	Ga	Li	Na
0,002	<0,0001	0,007	-	<0,0001
Cr	Ni	Zn	Ti	B
<0,0001	0,003	0,006	0,002	0,002
Pb	Sn	Sr	V	Al
0,002	0,002	-	0,0006	99,47

En la Tabla 7 se presenta la comparación de la composición química del producto con la composición requerida por la norma ASTM B 800-05 y por la norma interna de la empresa y su respectiva correspondencia [15].

Tabla 7: Comparación de la composición química.

Elemento	Porcentaje en peso		
	Producto	ASTM B800-05	Norma Interna
Si	0.083	0,03-0,15	0,03-0,10
Mg	0,006	-	-
Fe	0,41	0,40-1,0	0,40-0,42
Ga	0,007	0,03 Max	0,02 Max.
Ti+V	0,002	*	0,02 Max.
B	0,002	-	-
Cr	< 0,0001	*	0,003 Max.
Zn	0,006	0,10	0,03 Max.
Mn	0,005	*	0,006 Max.
Ni	0,003	*	0,02 Max.

La sumatoria de las composiciones químicas restantes, marcadas con un asterisco * no debe sobrepasar el 0,15 por ciento de la composición total.

Caicedo y Murgía [16] concluyeron en su investigación que el proceso de producción (colada, trefilación y tratamiento térmico) se inicia en el monitoreo y control de las variables, mantener los factores significativos en los rangos propuestos asegura el proceso uniforme. El control de proceso como un objetivo de calidad, con acciones preventivas, correctivas y/o de mejoramiento antes de que originen problemas en el producto final es de vital importancia. Se requiere un excelente

refinado y también el control del proceso que minimice las pérdidas y el reproceso (producto no conforme) para asegurar la calidad del producto en el tratamiento térmico.

Los resultados obtenidos para las muestras sin tratamiento térmico de recocido se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8: Resultados obtenidos de las muestras sin tratamiento.

	PE	PI
Carga Última (kgf)	826,60	847,78
Alargamiento (mm)	39,90	38,69
Resistencia Eléctrica (Ω/km)	0,41	0,40
Diámetro (mm)	9,47	9,50
Masa (g)	296,96	299,47

Los resultados obtenidos para la punta interna y la punta externa del esfuerzo último, elongación y conductividad eléctrica se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9: Datos promedios de los ensayos mecánicos y eléctricos.

	PE	PI
A (mm^2)	70,24	70,84
σ_U (Kgf/mm^2)	11,77	11,97
δ (%)	15,28	15,80
CE (% IACS)	60,52	60,51

3.1. Tratamiento térmico de recocido

Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 10, 11 y 12.

Tabla 10: Datos obtenidos de los instrumentos.

Tiempo recocido (Horas)	Carga Ultima (kgf)		Alargamiento δ (mm)	
	PE	PI	PE	PI
6	569,72	634,32	91,58	78,67
8	559,80	597,03	94,49	94,91
10	567,27	571,64	99,07	101,99
12	536,04	566,1	97,41	107,40

Tabla 11: Datos obtenidos de los instrumentos.

Tiempo recocido (Horas)	Resistencia Eléctrica (Ω/km)	
	PI	PE
6	0,3940	0,3927
8	0,3967	0,3940
10	0,3827	0,3914
12	0,3939	0,3906

Tabla 12: Diámetro y peso de las probetas.

Tiempo recocido (Horas)	Diámetro (mm)		Peso (gf)	
	PE	PI	PE	PI
6	9,63	9,53	296,02	295,60
8	9,48	9,61	295,28	300,00
10	9,63	9,49	302,48	298,50
12	9,59	9,54	302,49	300,52

Después del tratamiento de recocido en los diferentes tiempos de exposición, con los datos obtenidos de los instrumentos se calcula el área de sección (A), el esfuerzo último (σ_U), la elongación (δ) y la conductividad eléctrica (CE) en la PE y PI mostrada en la Tabla 13.

De igual manera se representan las diferencias alcanzadas después del tratamiento térmico a diferentes tiempos de las propiedades eléctricas (conductividad eléctrica) al esfuerzo de rotura y al porcentaje de elongación con respecto a material sin tratamiento térmico, según la Tabla 14.

El comportamiento del material sometido a tratamiento térmico de recocido es consistente con los fundamentos teóricos que rigen la recuperación del material con endurecimiento y de las tensiones internas por deformación que aparecen durante el proceso de fabricación, que pudieran afectar las especificaciones del producto.

De la misma manera como Orsi [17] en un estudio observó al caracterizar dos aleaciones de aluminio, que el aumento de la tensión de fluencia y de rotura está relacionado al endurecimiento por deformación que presentan ambos materiales durante el trefilado, en la Figura 7 se observa como disminuye el esfuerzo último al incrementarse el tiempo de exposición, por la recuperación

Tabla 13: Datos Obtenidos para Tratamiento de Recocido (6, 8, 10 y 12 Horas).

Tiempo recocido	6 Horas		8 Horas		10 Horas		12 Horas	
	PE	PI	PE	PI	PE	PI	PE	PI
A (mm^2)	70,02	69,92	69,85	70,96	71,55	70,61	71,55	71,09
σ_U (Kgf/mm^2)	8,14	9,07	8,01	8,41	7,93	8,10	7,49	7,96
Elongación (%)	26,20	22,50	27,00	27,10	29,10	28,30	29,10	30,30
CE (%IACS)	62,50	62,70	62,20	61,70	62,40	62,70	62,80	62,10

Tabla 14: Diferencias entre material sin recocido y material después del tratamiento térmico (6, 8, 10 y 12 Horas).

Tiempo recocido	6 Horas		8 Horas		10 Horas		12 Horas	
	PE	PI	PE	PI	3,77	3,84	4,08	4,01
σ_U (Kgf/mm^2)	3,70	2,69	3,73	3,71	14,0	13,1	13,1	15,0
δ (%)	10,4	6,9	11,7	11,3	1,8	2,1	2,4	1,7
CE (%IACS)	2,0	2,1	1,7	1,1	3,77	3,84	4,08	4,01

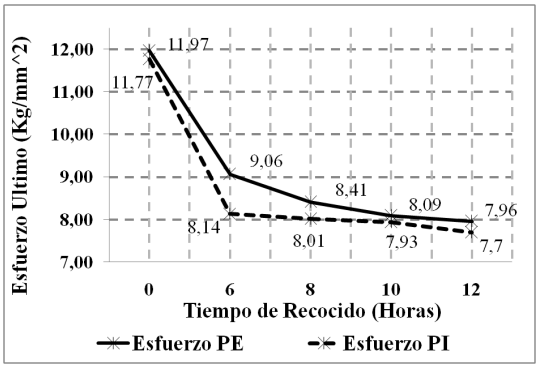


Figura 7: Esfuerzo último vs tiempo de recocido.

acuerdo con la Figura 8.

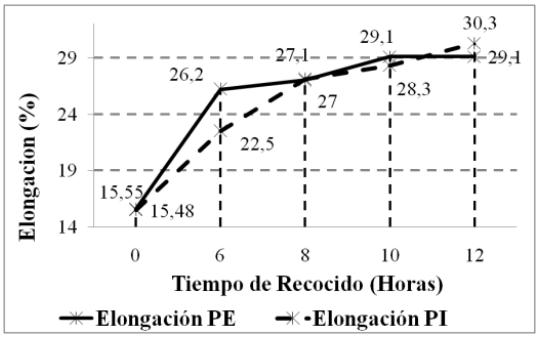


Figura 8: Elongación vs tiempo de recocido.

del endurecimiento por deformación que sufre el material en el proceso de fabricación, haciéndose más dúctil. En función a lo antes expuesto se debe establecer un tiempo específico de recocido del material con las características más favorables de este ante el recocido.

Se destacó que para todas las etapas del recocido cumple por encima de su promedio ponderado con la especificación de calidad más exigente del esfuerzo último para el caso de exportación (6–9 kg/mm^2).

El comportamiento de la elongación es consistente con el aumento de la ductilidad, presentando una tendencia de crecimiento de alrededor a 45° y un promedio de R^2 aproximadamente de 0,80 de

Como Jiménez [18] lo expone, “La deformación es el resultado del movimiento de defectos microscópicos a través del cristal (interacciones entre el campo de deformación y las dislocaciones), al correlacionar las propiedades mecánicas con las características microestructurales”, concluye que el incremento del esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción y la microdureza evidencian que el material se ha endurecido. En el caso de la aleación AA-8176 también se endurece por deformación plástica en el proceso de fabricación y recupera sus propiedades en el tratamiento de recocido (Figura 9), donde se denota que a mayor tiempo de recocido disminuye el esfuerzo último y aumenta la elongación.

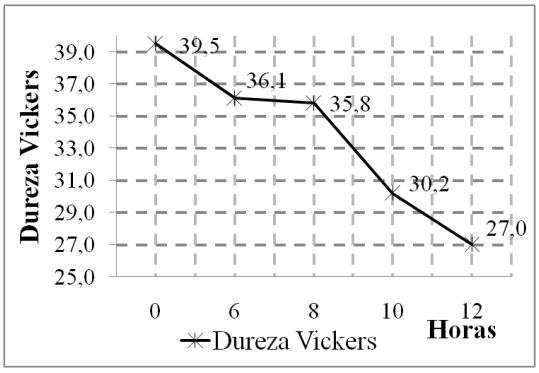


Figura 9: Dureza Vickers vs tiempo de recocido.

Se destaca la importancia del tratamiento térmico de recocido para alcanzar las especificaciones del producto requeridas tanto para consumo interno o de exportación.

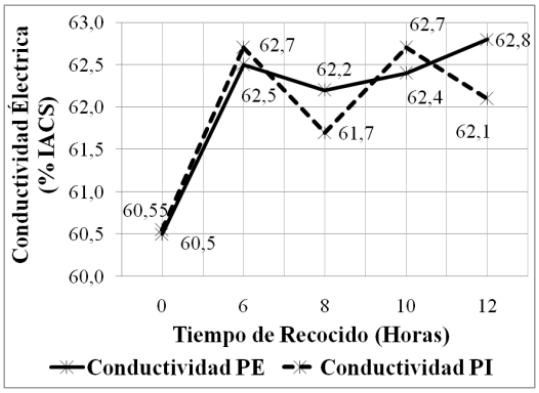


Figura 10: Conductividad eléctrica vs tiempo de recocido.

En la Figura 10 se observa como la conductividad eléctrica del material fue afectada levemente por el aumento del tiempo de recocido, se observó una pequeña oscilación en los valores en las PE y PI, esto podría indicar una relación de la conductividad con el endurecimiento o envejecimiento y tal vez esta pudiera estar más relacionada con la pureza de la aleación, asociada con las inclusiones metálicas o no metálicas (óxidos, inclusiones metálicas o no metálicas e impurezas).

Garzón et al. [19] realizaron un tratamiento de homogenización de dos horas a una temperatura de 570 °C, más un enfriamiento rápido y un tratamiento de envejecimiento de 0-18 horas. Concluye que debido al envejecimiento se producen los procesos de nucleación y crecimiento de los precipitados (difusión de los granos), lo que permite un cambio en la conductividad eléctrica de la aleación AA 8176 y el tiempo de envejecimiento cambia el carácter morfológico de la aleación AA-8176, es decir, cambia la microestructura y mejora su conductividad eléctrica. En este estudio el procedimiento fue un recocido de 6, 8, 10 y 12 Horas a una temperatura entre 500-520 °C, esto pudo haber inducido un efecto de envejecimiento que favoreció la microestructura y la conductividad del material por los resultados que se observan en la Figura 10.

Como lo indican Jablonski et al. [20] en un conductor real, el cual posee defectos producto, de las imperfecciones de la red: la movilidad y velocidad de las cargas eléctricas depende críticamente del número y tipo de defectos estructurales, a mayor número de defectos de la red, menor distancia entre colisiones, menor movilidad y menor conductividad eléctrica. Los electrones se desplazan por el material como ondas electromagnéticas que permiten ajustar su periodicidad a la red cristalina. Esto valida que la conductividad se ve afectada por las imperfecciones del material, por lo que la aleación de aluminio debe ser muy bien refinada para minimizar en lo posible el número de estas imperfecciones para obtener un buen conductor eléctrico.

3.2. Ensayo de Microdureza.

Se realizó el ensayo de dureza a las muestras y se presentan los resultados obtenidos en la Tabla 15.

Tabla 15: Resultado del ensayo microdureza.

Tiempo Recocido (Horas	D1 (mm)	D2 (mm)	Dureza (HV)
0	0,0488	0,0482	39,5
6	0,0516	0,0498	36,1
8	0,0514	0,0504	35,8
10	0,0536	0,0572	30,2
12	0,0585	0,0587	27,0

Se observó que a medida que se incrementa el tiempo de exposición del recocido el material

se hace más dúctil, esto se demostró como una disminución constante del valor de dureza del material (Figura 9). Se apreció un crecimiento de grano desde 30 μm hasta alcanzar un tamaño promedio de 200 μm para el recocido de 12 horas, así como también la disminución de la dureza.

Cuando los granos están libres de deformación desaparece el reforzamiento creado por el trabajo en frío y eso explica la disminución de la resistencia y la dureza.

3.3. Microestructura antes y después del tratamiento térmico

Se realizó el procedimiento a las muestras para ser visualizadas a través de microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido.

Ensayo de microscopia óptica. En la microscopia se observa para el estado inicial sin revenido una microestructura característica de la aleación de aluminio AA-8176 con algunas imperfecciones y porosidades que se revelaron en la microscopia electrónica de barrido.

En la Figura 11 se muestran las micrografías del material para un tiempo de revenido de: 0, 6, 8, 10 y 12 horas, en estas imágenes se puede observar que a medida que aumenta el tiempo de revenido el tamaño del grano hay un crecimiento del tamaño de grano de 30 μm para 6 Horas hasta 200 μm para el recocido de 12 horas. Así como también las fases comienzan a desaparecer, presentándose un proceso de nucleación y crecimiento. También que se revelan mejor las imperfecciones, que presentan formas redondeadas.

3.4. Ensayo de Microscopia Electrónica de Barrido

Las fotomicrografías para un tiempo de revenido de: 0, 6, 8, 10 y 12 horas mostradas en la Figura 12, donde se observaron inclusiones como formas o puntos oscuros que resaltan de manera brillante con una forma poco uniforme, asimismo las porosidades se detallan como líneas alargadas o puntos claros opacos más pequeños que las inclusiones. Se demostró la presencia de un alto índice de imperfecciones como inclusiones metálicas y no metálicas, presencia de óxido de aluminio y carbonatos, así como también muchas porosidades en una matriz rica de aluminio.

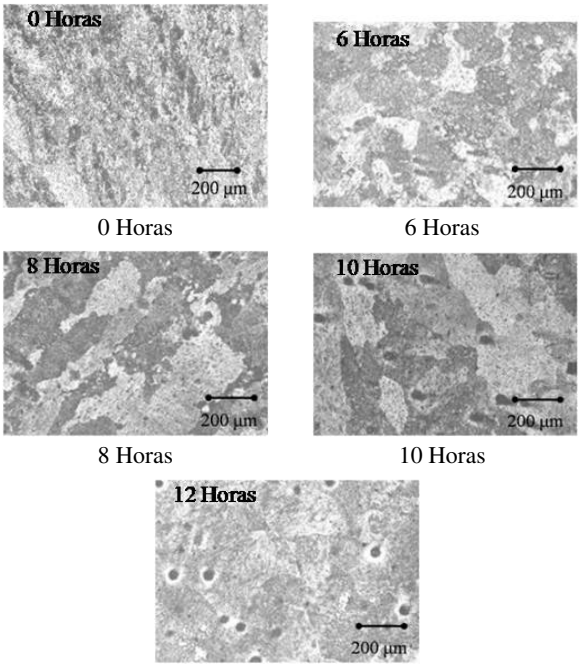


Figura 11: Fotomicrografía del material con revenido de 0, 6, 8, 10 y 12 horas.

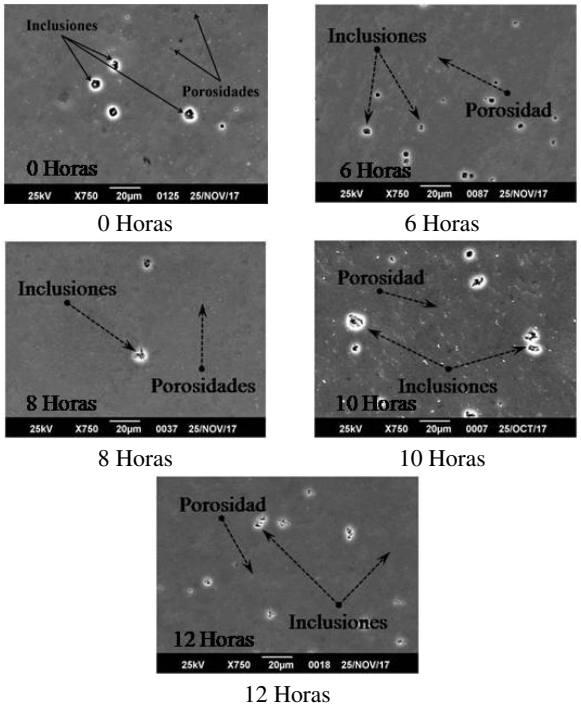


Figura 12: Fotomicrografía con MEB para 0, 6, 8, 10 y 12 Horas.

En el estudio del Detector de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS) junto con el mapeo de las muestras analizadas se observaron los precipitados compuestos por elementos como hierro, cobre, silicio y las fases A_{l6}(Fe, Cu) y el resto matriz de aluminio. Con una composición química constituida por oxido de aluminio Al_2O_3 (alúmina), dióxido de silicio SiO_2, hierro en diferentes fases Fe, carbonatos de calcio $CaCO_3$ y la presencia de gases como oxigeno (O_2) que constituyeron en la porosidad presente de la aleación AA-8176 (Figura 13). Se considera que las inclusiones de Fe y Si presentes son las que predominan y tienen un tamaño promedio aproximado de 15μm.

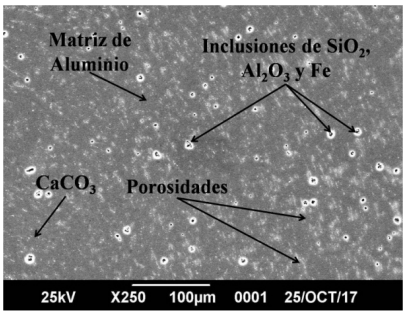


Figura 13: Algunas imperfecciones del Material.

En las Figuras 14, 15, 16, 17 y 18 se presentan las micrografías del ensayo de MEB con un aumento de 2000X, en donde se muestran algunas de las muchas imperfecciones e inclusiones metálicas o no metálicas presentes en el material, las cuales se revelaron en todas las etapas de recocido. La aleación base presenta gran cantidad de porosidades e inclusiones metálicas y no metálicas, que se deben depurar porque no contribuyen con la calidad del producto y afectan las propiedades del material.

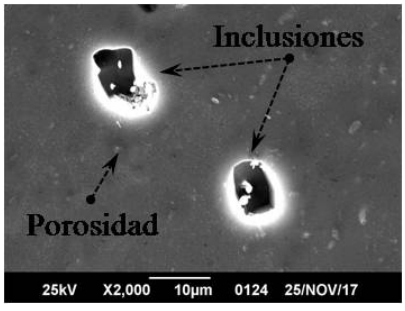


Figura 14: Material en condición original.

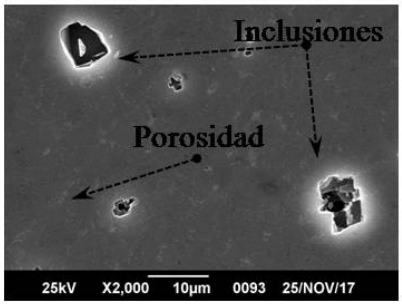


Figura 15: Con recocido de 6 horas.

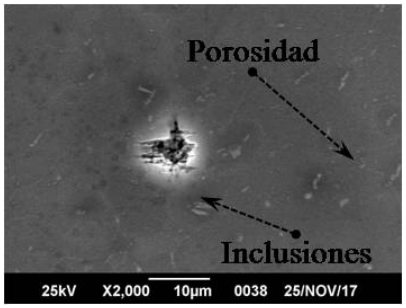


Figura 16: Con recocido de 8 horas.

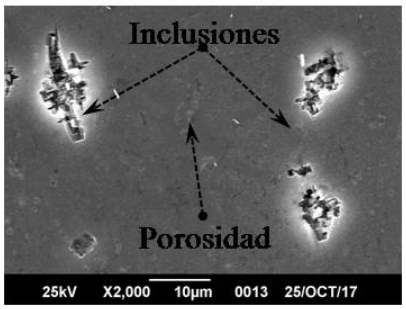


Figura 17: Con recocido de 10 horas.

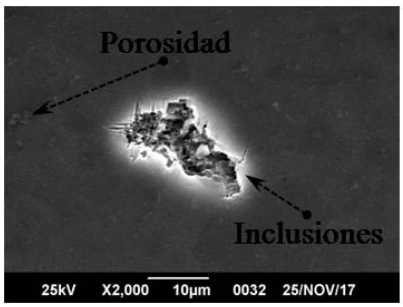
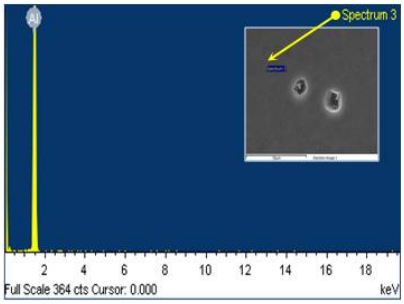


Figura 18: Con recocido de 12 horas.

El EDS (Energy Dispersive Spectrometer) reveló la microestructura típica del aluminio, se observaron inclusiones y precipitaciones y se determinó la composición química de estos puntos observados en la muestra, así como también

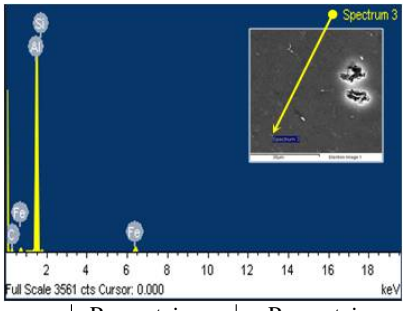
cualquier otro elemento de la matriz de aluminio. Para ello, en las Figuras 19, 20, 21 y 22 se presentan los puntos seleccionados para el análisis de las muestras de la aleación AA-8176.

Para la Figura 19, en el punto seleccionado se obtuvo como resultado una composición de 100 por ciento de aluminio. Por lo que se considera que solo hay aluminio en este punto.



Elemento	Porcentaje en peso	Porcentaje en peso atómico
Al K	100,00	100,00
Total	100,00	100,00

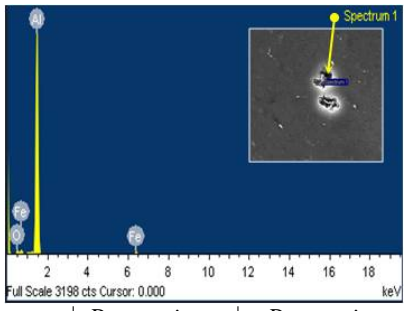
Figura 19: Ensayo de EDS 1.



Elemento	Porcentaje en peso	Porcentaje en peso atómico
C K	28,83	48,85
Al K	62,76	47,34
Si K	2,05	1,49
Fe K	6,36	2,32
Total	100,00	100,00

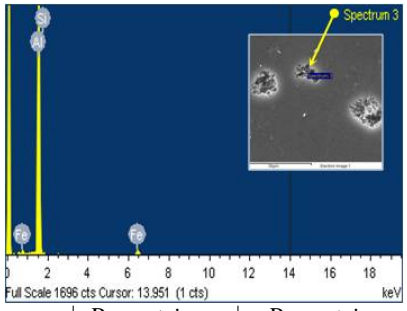
Figura 20: Ensayo de EDS 2.

En la micrografía mostrada en las Figuras 20, 21 y 22 se encontraron concentraciones de carbono y algo de silicio, oxígeno, hierro y por supuesto la matriz de aluminio en los puntos estudiados, lo cual indica que la aleación presenta componentes que producen porosidades, y precipitados de Fe, Si y otros elementos que disminuyen las propiedades y la conductividad de los conductores eléctricos fabricados con la aleación de aluminio AA 8176.



Elemento	Porcentaje en peso	Porcentaje en peso atómico
O K	11,98	19,04
Al K	83,83	79,05
Fe K	4,19	1,91
Total	100,00	100,00

Figura 21: Ensayo de EDS 3.



Elemento	Porcentaje en peso	Porcentaje en peso atómico
Al K	92,66	95,34
Si K	2,06	2,03
Fe K	5,28	2,63
Total	100,00	100,00

Figura 22: Ensayo de EDS 4.

Como lo indica Garzón et al [19], cualquier aumento en la conductividad tiene un impacto directo en la reducción de la pérdida de energía en líneas eléctricas, con sus respectivas consecuencias económicas, técnicas y ambientales. Esto determina que al mejorar la calidad del material y mantener el control del proceso de producción para obtener un conductor eléctrico con un nivel mínimo de imperfecciones o inclusiones que le permitirán una mejor eficiencia eléctrica en beneficio del ambiente.

4. Conclusiones

Se reconoce como una política acertada la sustitución de importaciones, cuando la importación

es complicada o los costos implícitos son altos, asi como también en general.

Se debe mejorar al inicio el refinado de la aleación AA-8176 para disminuir las imperfecciones e inclusiones metálicas o no metálicas, el porcentaje de gases, dióxido de silicio, carbonatos de calcio e impurezas para obtener un mejor producto final.

A medida que se incrementa el tiempo de exposición del tratamiento térmico de revenido el material se hace más dúctil y su tamaño de grano aumenta.

Los resultados de las propiedades mecánicas y eléctricas de la aleación AA-8176 obtenidos con el tratamiento térmico de recocido en todas sus etapas de 6, 8, 10 y 12 horas se ajustan a las normas ASTM B800-05 y a las especificaciones técnicas de la empresa.

Se estableció el revenido de 8 horas como el más favorable en función de la especificación del producto y de la optimización del tiempo, en relación al esfuerzo de ruptura, conductividad, elongación y al crecimiento del grano, que inciden directamente en las propiedades del material.

5. Referencias

[1] S. Kalpakjian y S. Schmid, *Metales y aleaciones no ferrosas: producción, propiedades generales y aplicaciones*, 5ta ed. México: Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 2008.

[2] J. Espinoza, *Manual práctico de carpintería metálica*. Editorial Visión Libros, 2013.

[3] M. Jiménez, "Análisis técnico económicos de la fabricación y utilización de conductores eléctricos de aluminio aislados hasta 2000 voltios," Trabajo especial de grado, Escuela Politécnica Nacional de Ingeniería, Ecuador, 2003.

[4] M. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*. México: Pearson Editores. Prentice Hall Hispanoamérica S.A., 1997.

[5] W. Callister, *Propiedades eléctricas*, 1era ed., serie Ciencia e ingeniería de los materiales. España: Reverté, S.A., 2007.

[6] CODELECTRA, *COVENIN 452-89, Determinación de la resistividad de materiales metálicos conductores eléctricos*, COVENIN, COVENIN Standard COVENIN 452-89, 1989.

[7] P. Mangonon, *Ciencia de materiales selección y diseño*. Atlacomulco, México: Pearson Educación México, 2001.

[8] ASTM, *ASTM B 557. Standard Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum-and Magnesium-Alloy Products*, ASTM International, 2015.

[9] ASTM, *ASTM B 193-02. Método estándar para la prueba de resistividad de materiales conductores eléctricos*, ASTM International, 2002.

[10] E. Avallone y T. Baumeister, *Manual del Ingeniero Mecánico*, 9th ed. México: McGraw-Hill/Interamericana de México, S.A., 2004, vol. tomo 1.

[11] F. Morral y E. Jimeno, *Metales ligeros*, 1era ed. España: Reverté, S.A., 2004.

[12] R. Norton y E. Jimeno, *Propiedades de materiales*. México: Pearson Education, S.A., 2011, ch. Apéndice E, pp. 986–987.

[13] *ASTM E3-01. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*, ASTM International, 2002.

[14] ASTM, *ASTM E 407-07. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*, ASTM International.

[15] ASTM, *ASTM B 800-05. Método estándar para la prueba de resistividad de materiales conductores eléctricos*, ASTM International, 2002.

[16] N. Caicedo y R. Pons, "Optimización del Proceso de fabricación de Alambres de Aleación 6201 T-81," *INGE CUC*, vol. 7, no. 1, pp. 207–216, 2011.

[17] I. Orsi, "Evolución de defectos en el trefilado de alambrón de aluminio," ALUAR, Argentina, Reporte técnico, 2019.

[18] H. Jiménez, "Comportamiento mecánico y microestructural de la aleación AlMgSi para conductores eléctricos," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 18, no. 2, pp. 199–212, 2019.

[19] D. Garzón, E. García, y H. Sánchez, "Influencia del tiempo de envejecimiento en la conductividad eléctrica de aleaciones de aluminio serie 8000 AA-8176," *Revista Información Tecnológica*, vol. 30, no. 6, pp. 101–110, 2019.

[20] M. Jablonski, T. Knych, and B. Smyrak, "Effect of iron addition to aluminium on the structure and properties of wires used for electrical purposes," *Material Science Forum*, no. 54, pp. 459–462, 2011.