

## Influencia del Tiempo de Envejecimiento en la Conductividad Eléctrica de Aleaciones de Aluminio Serie 8000 AA-8176

Diego Garzón, Edwin García\* y Héctor Sánchez

Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación TESLA, calle 67 No. 53 - 108, Medellín-Colombia (e-mail: dgarzonv68@gmail.com; edwin.garciaq@udea.edu.co; hector.sanchez1@udea.edu.co)

\* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

Recibido Abr. 8, 2019; Aceptado Jun. 10, 2019; Versión final Jul. 23, 2019, Publicado Dic. 2019

---

### Resumen

Se analizaron diez muestras de una aleación de aluminio con designación AA-8176, utilizando el mismo tratamiento térmico de homogenización a 570°C. Posteriormente, estas muestras se sometieron a diferentes condiciones de tiempo de envejecimiento artificial entre 180 y 210°C. Las variaciones en la temperatura debidas al efecto Joule se midieron para una densidad de corriente eléctrica en el rango de 5-40 A/mm<sup>2</sup> en cada muestra aleada. A través del proceso de fabricación de la aleación AA-8176, se tuvieron en cuenta aspectos tales como el tamaño, la forma y los precipitados debidos a los diferentes elementos de aleación presentes en la muestra. A través del efecto Joule, se observa que dos de las muestras exhiben puntos óptimos con buena conductividad eléctrica, correspondientes a 6 y 18 horas de envejecimiento a una temperatura de 210°C. Además, el análisis metalográfico reveló una mejor reorganización en la matriz de aluminio y un menor número de precipitados, a medida que aumenta el tiempo de envejecimiento.

*Palabras clave: aleación de aluminio; homogenización; envejecido; precipitados; conductividad eléctrica; efecto joule; metalografía*

## Influence of the Aging Time on the Electrical Conductivity of the Designation of the Series 8000 AA-8176 Aluminum Alloys

### Abstract

Ten samples of aluminum alloys with designation AA-8176 were analyzed, using the same homogenization thermal treatment at 570°C. Subsequently, these samples were subjected to different aging-time conditions ranging from 180°C and 210°C. Variations in temperature due to the Joule effect were measured for an electric current density in the range of 5-40 A/mm<sup>2</sup> in each alloyed sample. Through the manufacturing process of the AA-8176 alloy, aspects such as size, shape, and precipitates due to the different alloying elements present in the specimen were taken into account. Through the Joule effect, it was observed that two of the samples exhibit optimal points with good electrical conductivity, corresponding to 6 and 18 hours of aging for a temperature of 210°C. Furthermore, the metallographic analysis revealed a better rearrangement in the aluminum matrix and a lower number of precipitates, as the aging time is increased.

*Keywords: aluminum alloy; homogenization; aging; precipitates; electrical conductivity; joule effect; metallography*

## INTRODUCCIÓN

Actualmente hay un gran interés en el desarrollo de nuevos materiales debido a los continuos avances y exigencias tecnológicas (Aguilar et al., 2009). Es por esta razón que la última década el aluminio ha ganado una importancia relevante debida principalmente a la escasez del cobre extraído en las minas, y también por la característica superior que presenta de la capacidad de conducción de corriente frente a la densidad. Esta crisis del cobre causó como consecuencia un aumento dramático en su costo debido a una mayor demanda del mineral. Basados en los anteriores precedentes en la industria colombiana gran parte de la producción del cobre y algunos metales ligeros como el aluminio y sus aleaciones es realizada a través de procesos de reciclaje (Millán et al., 2015), dando paso al aluminio para asumir un rol predominante en las aplicaciones que anteriormente eran exclusivas del cobre, como la conducción de electricidad en sistemas de baja tensión, bobinado de motores y generadores y electrodos de puesta a tierra, entre otros. El aluminio es el segundo elemento metálico utilizado más en aplicaciones eléctricas después del cobre. Esto se debe principalmente a sus excelentes propiedades, como su resistencia mecánica en varias aleaciones, su resistencia a la corrosión en varios medios, su alta conductividad eléctrica y térmica, su bajo peso y su buena ductilidad, entre otros.

Los sistemas Al-Fe-Si son de especial interés para la industria del aluminio porque la mayoría de las aleaciones de aluminio contienen una cantidad considerable de hierro y silicio como impurezas típicas de su proceso de fabricación o de las adiciones de la aleación (Belov et al., 2002; Rajat et al., 2009). Además, es importante profundizar en el estudio de aleaciones de base aluminio que puedan sustituir otras aleaciones en aplicaciones de alta conductividad eléctrica. Por otra parte, elementos como el silicio y hierro forman precipitados a partir de aleaciones líquidas después de la solidificación y forman fases ternarias duras y frágiles de Al-Fe-Si. Para un proceso de envejecimiento artificial, dentro de un rango de temperatura de 180 -220°C, el aluminio aparece como la fase primaria reforzada con los precipitados. A esta temperatura, se producen los procesos de nucleación y crecimiento de las partículas reforzantes. La cantidad relativa de  $FeAl_3$  formada en la mezcla eutéctica es pequeña en comparación con el Al de la solución sólida. Finalmente, se forman las capas  $FeAl_3$ ,  $Fe_2Al_5$ , así como la forma  $FeAl$  bajo la interfaz líquido-sólido en movimiento (Maitra et al., 2003). Cada uno de ellos influye en las propiedades mecánicas, conductividad eléctrica, la resistencia a la corrosión y la calidad superficial del producto finalmente obtenido.

En la industria eléctrica, las posibilidades de tratamiento térmico del aluminio en alambres finos se limitan significativamente a los problemas tecnológicos. Las razones principales de la escasez de propiedades de deformación del aluminio, que son significativamente importantes en el proceso de trefilado, son su alto coeficiente de fricción, la baja adherencia a la superficie y la escasa plasticidad, como consecuencia de la presencia de silicio en el mineral de bauxita del que se extrae. Las impurezas que se encuentran en el proceso de obtención de aluminio son aquellas que reducen la ductilidad del material. Entre ellos se encuentran silicio, hierro y otros metales (Peng et al., 2011). La eliminación o reducción significativa de este fenómeno negativo se puede lograr mediante la adición de hierro al aluminio mediante formaciones químicas de compuestos con puntos de fusión altos, como  $Al_3Fe$ , que ayudan a la limpieza de la matriz de trefilado mediante la eliminación de adherencias parches de aluminio. Este proceso contribuye a minimizar el umbral de ductilidad y también genera una ligera reducción de la conductividad eléctrica de la aleación a base de aluminio, 10% de reducción para un 1% de contenido de peso de Fe (Jablonski et al., 2009; Correa et al., 2014).

La producción de alambres basados en aluminio para aplicaciones eléctricas se lleva a cabo en dos etapas. El primero contempla la fabricación de un alambroón con un diámetro que varía entre 9,5 mm y 19,0 mm; y la segunda etapa consiste en el trefilado de dichas varillas de alambre hasta alcanzar el diámetro final para ser utilizado posteriormente en redes de distribución eléctrica. Las aleaciones de la serie 8000 muestran una respuesta aceptable al tratamiento de envejecimiento térmico debido a la adición de elementos de aleación como cobre, silicio, zinc o manganeso. Todos estos elementos permiten el endurecimiento por precipitación, un fenómeno que modifica significativamente las propiedades mecánicas y eléctricas de dicha aleación (Correa et al 2011; Jablonski et al., 2009; Jablonski et al., 2011). Cada uno de los elementos individuales o combinados exhibe un aumento de la solubilidad sólida en el aluminio cuando se incrementa la temperatura. Pero para obtener este beneficio, se debe seguir un procedimiento de tratamiento térmico adecuado.

En el sector eléctrico, el aluminio se ha utilizado comúnmente en líneas eléctricas para frecuencias industriales. Estos elementos se producen con las aleaciones de la serie 8000 y se utilizan principalmente para la fabricación de alambres de aluminio utilizados en las redes de distribución eléctrica y también como polos de conexión a tierra (Aitken et al., 2012), teniendo en cuenta todos los beneficios proporcionados por el aumento de sus propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas, así como su coste de fabricación inferior, que es fundamentalmente importante tanto para el fabricante como para el usuario. Esta gran aplicación en el campo de la conducción de energía eléctrica destaca la relevancia de los trabajos de investigación y los resultados correspondientes que impulsan la mejora de la conductividad eléctrica de las aleaciones de aluminio, ya que cualquier aumento en dicha conductividad tiene un impacto directo en la reducción de la

pérdida de energía en líneas eléctricas, con sus respectivas consecuencias económicas, técnicas y ambientales. El objetivo de esta investigación es analizar los cambios en la temperatura debidas al efecto Joule sobre la aleación AA-8176 bajo los diferentes tiempos de envejecimiento al ser sometida a una variación de corriente eléctrica de 5-40 A/mm<sup>2</sup>.

## METODOLOGÍA

Para este estudio se partió de un proceso de fundición de la aleación un en horno de inducción, segmentos de aluminio de la misma muestra con 10 m de longitud y 1.92 mm de diámetro se utilizaron para garantizar la misma composición y tamaño de grano para todo el análisis. Además, se añadió una aleación madre comercial (Al-5%, Ti-1%, B) como refinadora de grano. Luego, se fundió un botón (0.3 cm,  $\phi = 2.54$  cm) de la aleación comercial a base de aluminio ASTM designación AA 8176 (ASTM B800-05, 2011) para el análisis de composición química. Todo este proceso se resume en el diagrama de la figura 1.



Fig 1: diagrama experimental del proceso de fabricación y caracterización de la aleación AA-8176.

### Tratamiento de Homogenización

La segunda prueba fue un tratamiento térmico de homogeneización a 570 °C durante dos horas en un horno de mufla industrial, que permite variar la temperatura hasta 1200 °C. Luego, cada una de las muestras se somete a enfriamiento rápido con el fin de congelar la estructura cristalina de la aleación después del tratamiento térmico. Una vez que las muestras se han homogeneizado, se les aplica otro tratamiento térmico, conocido como envejecimiento. Después de eso, se aplicó un proceso de enfriamiento a diez segmentos de la muestra comercial, cuyo tamaño fue de 28 cm de largo y 1,92 mm de diámetro. Los tiempos de envejecimiento para cada uno de los segmentos varían de 0 a 18 horas. Fue necesario aplicar la misma caracterización a todos ellos con el propósito de observar cualquier cambio en la muestra. Finalmente, se realizó un proceso de templado en frío para congelar la estructura cristalina, provocar homogeneidad de los precipitados y así disminuir la dureza en la aleación (Rajat et al., 2009). La selección del tiempo se realizó de acuerdo con los estándares de la norma ASTM como se establece en el manual del metal vol. 4 (Correa et al., 2014). Se utilizó un espectrómetro de emisión óptica de alta gama Bruker modelo Q8 Magellan para obtener la composición química de la muestra. Este dispositivo revela el porcentaje másico de los metales presentes en la muestra, como se puede observar en la tabla 1 de los resultados. Esta es la composición química de diferentes aleaciones utilizadas actualmente tanto a nivel local (en Colombia) como internacional bajo la norma ASTM, designación AA-8176, para uso eléctrico (Aitken et al., 2010; ASTM B800-05, 2011).

### Tratamiento de Envejecimiento T6

Una vez que se homogeneizó todo el conductor, el proceso de envejecimiento se aplicó a los diez segmentos de la muestra comercial. Cada muestra tenía 28 cm de largo y el diámetro era equivalente a un conductor de 12 AWG. La temperatura para el proceso de envejecimiento fue de 210 °C durante 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 y 18 horas; y se aplicó un enfriamiento posterior en agua con el fin de congelar las fases cristalinas de cada una de las muestras en su correspondiente tiempo de envejecimiento. Esto con el fin de poder determinar la influencia el tiempo de envejecimiento artificial en la conductividad de la aleación. El análisis metalográfico se realizó en un microscopio Nikon Eclipse PM 100, Keller 2% se utilizó como reactivo de ataque. Luego, las muestras se llevaron a un microscopio electrónico de barrido (termoiónico) JEOL-JSM 6490LV. Estas dos pruebas se utilizan para observar la disposición de la microestructura interna del material sobre sus fases, que a su vez se correlaciona con la propiedad eléctrica de la conductividad. Para este proceso, las muestras de 4 cm de largo se cortaron transversalmente. Un procedimiento metalográfico convencional se realizó en estas secciones. Las imágenes se obtuvieron con un microscopio y se muestran en la figura 2.

### Pruebas de corriente estática

La prueba de corriente estática permite verificar la estructura a nivel micro del material en función de su comportamiento macroscópico en respuesta a la temperatura generada por el paso de una corriente eléctrica "efecto Joule". Esta prueba se rige por la norma internacional ANSI C119.4: 2004 y la norma colombiana NTC 5786 (NTC 5786, 2010). En esta prueba, las mediciones del efecto Joule se realizaron variando la intensidad de la corriente entre 5 A y 40 A, y se registró el aumento en la temperatura de las diferentes muestras. Este análisis se realizó en las muestras tratadas térmicamente con los siguientes tiempos de envejecimiento: 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 y 18 horas.

### Dureza Vickers

Un microindentador, Shimadzu HMV-G series fue utilizado con un marcador piramidal de diamante con base cuadrada y un ángulo incluido de  $136^\circ$  entre las caras opuestas. El intervalo de carga esta entre (1-120) Kg como lo establece la norma (ASTM E384-17, 2017). El probador de dureza Vicker funciona bajo el mismo principio que un probador Brinell, el número de la dureza Vickers es calcula con la formula  $HV = 1854.4 P/d^2$ . La carga Vickers utilizada para la prueba fue de 100 g.

## RESULTADOS

Los resultados se presentan y discuten en tres subsecciones: Composición Química; la Metalografía y el Ensayo de Corriente Estática (Efecto Joule)

### Composición Química

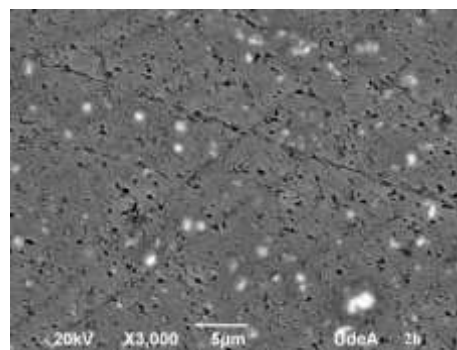
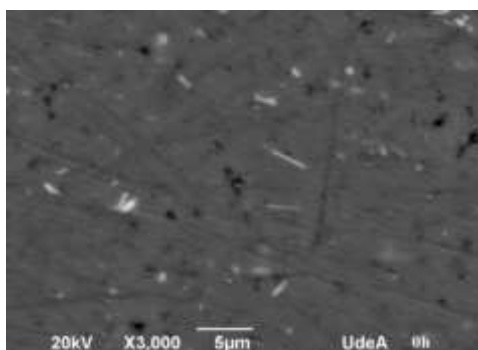
La tabla 1 presentan los resultados de composición química realizados a la muestra fabricada en el laboratorio y los valores de la norma ASTM B800-05 de la aleación AA-8176, que se utilizan en aleaciones a base de aluminio. También incluye el porcentaje de cada uno de los elementos que contiene la aleación.

Tabla 1: Norma ASTM B800-05 y composición química en porcentaje masivo (por ensayo de laboratorio) para cada elemento de la aleación AA-8176.

Elemento (%)	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ti	Cr	Sn	B
ASTM Standard	Balance	0.03-0.15	0.4-1.0	--	--	0.10	--	--	--	--
Resultado de laboratorio	99.42	0.086	0.418	0.055	0.003	0.01	0.004	0.001	0.01	0.00004

### Metalografía

En la figura 2 se muestran 10 micrografías, en cada una de ellas se puede observar que a medida que aumenta el tiempo de envejecimiento las fases comienzan a desaparecer, presentándose un proceso de nucleación y crecimiento.



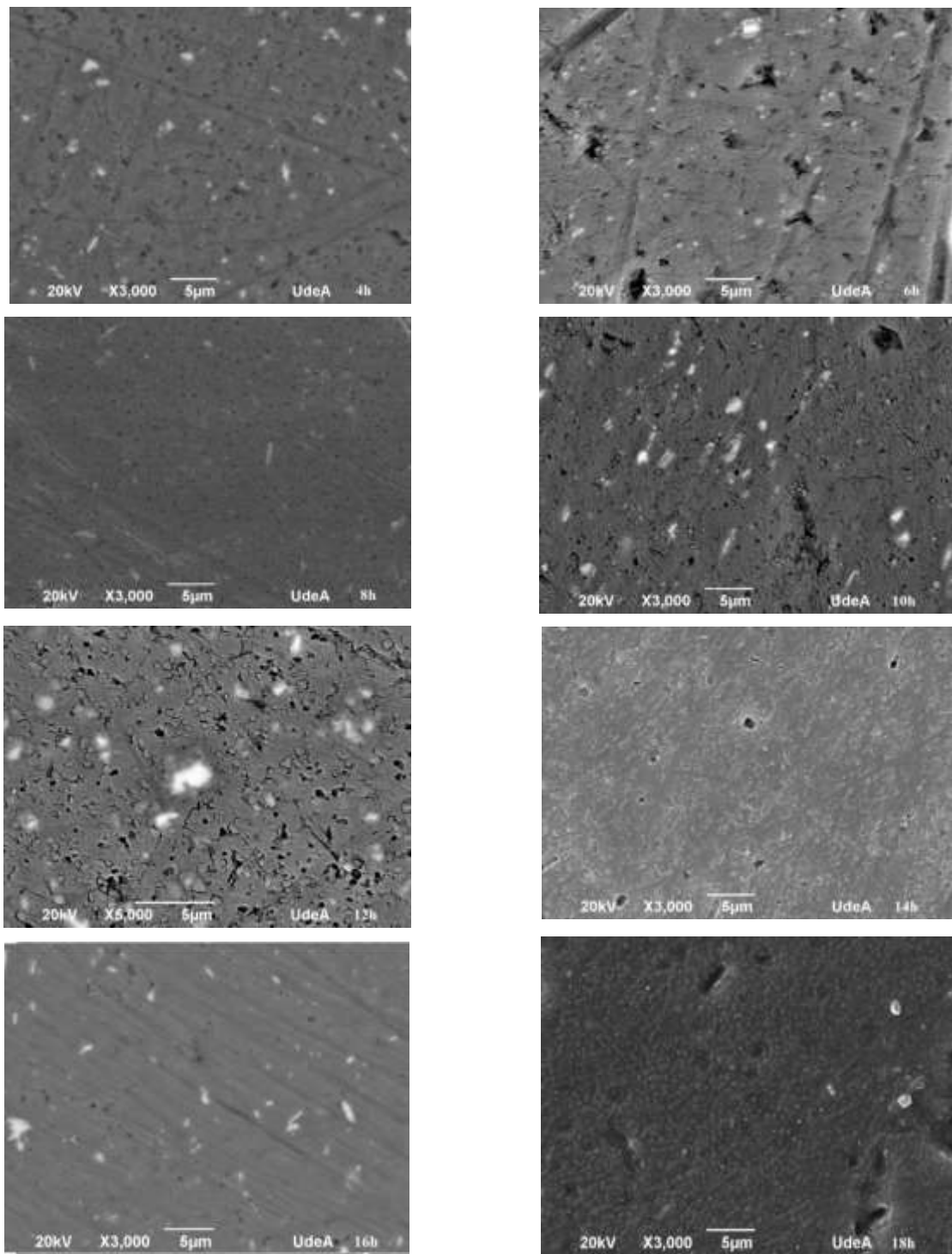


Fig. 2: Secuencia de micrografías para las 10 muestras de aleación de aluminio AA-8176 con los diferentes tiempos de envejecimiento (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18) horas, respectivamente.

El análisis por EDX (energía de dispersión de rayos-x) junto con el mapeo llevado a cabo en cada una de las 10 muestras presentó la misma composición, ya que revelaron que los precipitados en cada uno de ellos estaban compuestos por elementos como hierro, cobre, silicio y las fases  $Al_6(Fe, Cu)$ , el resto se debió a matriz de aluminio. Este comportamiento, común a todas las muestras se puede observar en la figura 3.

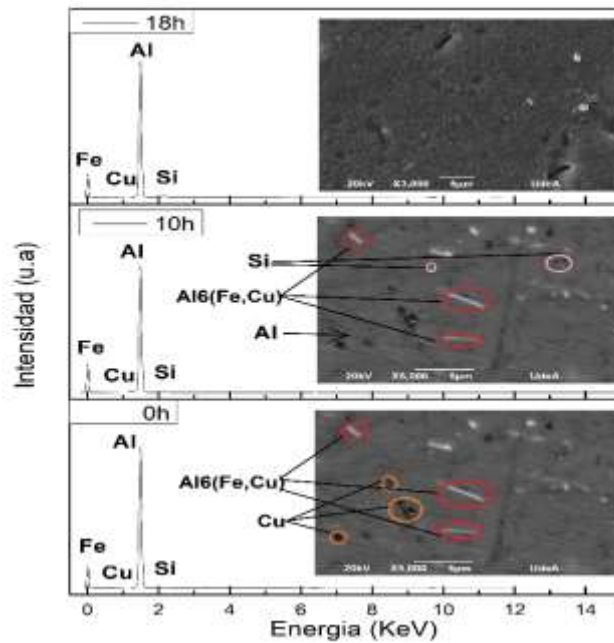


Fig. 3: EDX del promedio de 5 mediciones en diferentes puntos sobre las tres muestras de la aleación AA-8176 con (0, 10, 18) horas con tratamiento térmico de envejecimiento artificial.

Por otro lado, el tamaño promedio de la partícula para cada una de las muestras está entre 0.6 y 0.7  $\mu\text{m}$  (ver la tabla 2 y la figura 4), estos tamaños de partícula fueron medidos aplicando la norma ASTM E112. Esta norma establece que cuando la forma del grano no es uniforme, se trazan formas circulares sobre cada uno de los granos, luego se obtiene el promedio del total de los granos y haciendo uso de la intersección de dos diagonales en cada forma circular (grano) se obtiene un valor promedio medido de cada grano (ASTM E112-13, 2015, Correa et al., 2011).

Tabla 2: Tamaño promedio de las partículas de cada cable y el respectivo tiempo de envejecimiento.

Time (horas)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Promedio ( $\mu\text{m}$ )	0.67	0.61	0.54	0.64	0.69	0.61	0.66	0.55	0.60	0.58

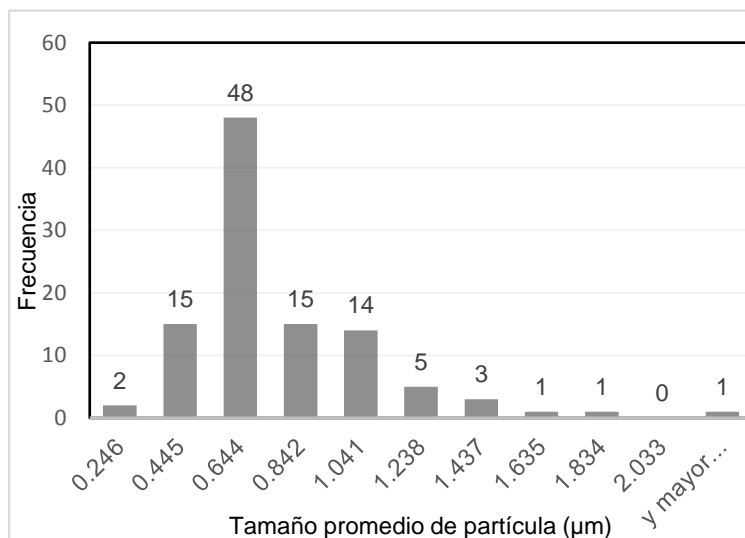


Fig. 4: Tamaño promedio de grano para la muestra con envejecimiento artificial de 6 horas

Se evidencia un comportamiento muy diferente sobre la microdureza Vicker en cada una de las muestras (ver la figura 5), es decir, mientras la dureza aumenta el tamaño promedio de las partículas disminuye y viceversa. Este comportamiento era de esperarse dado que en las estructuras cristalinas (metales y aleaciones metálicas) entre menor sea el tamaño de los cúmulos de partículas componentes (granos) mayores son sus propiedades mecánicas (Rajat et al., 2009).

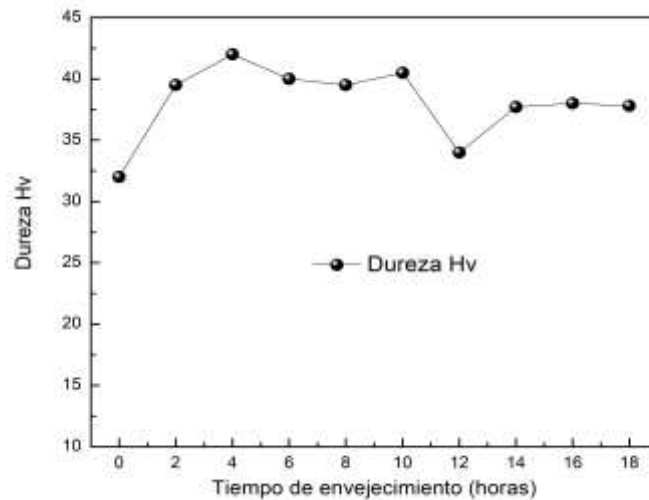


Fig. 5: microdureza Vicker de las muestras con tratamiento térmico de envejecimientos entre 0-18 horas

#### Ensayo de Corriente Estática (Efecto Joule)

La figura 6 muestra los resultados de la prueba de corriente estática que analiza los cambios de temperatura debidos al efecto Joule, que al final es una medida de la conductividad eléctrica de la aleación, para diez diferentes tipos de tiempos de envejecimiento (0h, 2h, 4h, 6h, 8h, 10h, 12, 14h, 16h, y 18h) y una intensidad de corriente de 5-40 A que fluye a través de la aleación AA-8176.

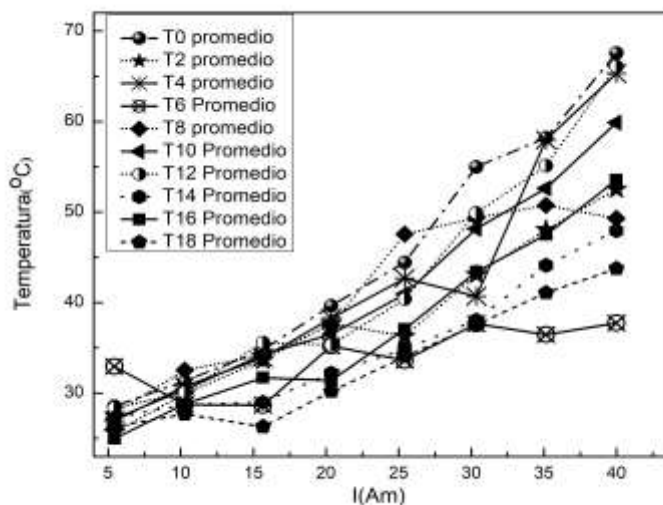


Fig. 6: Resultados del ensayo de corriente estática (efecto Joule) para 10 muestras con diferentes tiempos de envejecimiento (0-18) horas.

El calentamiento causado por el efecto Joule en las muestras presentó una disminución y un mejor comportamiento en este sentido en dos de ellas (6 h y 18 h) en comparación con las otras muestras. Estos valores de temperaturas de calentamiento del conductor son inferiores a 45°C, cuando la intensidad de corriente máxima alcanza los 40 A. El hecho anterior permite deducir que el tratamiento de envejecimiento térmico mejora la conductividad eléctrica de la aleación de aluminio original que se analizó debido a la homogeneización que produce en sus fases, fenómeno que también se presentó en el trabajo de (Correa et al., 2014). Además, los resultados también indican que el tiempo de envejecimiento óptimo es de 6 horas porque 18 horas de envejecimiento implican un mayor consumo de energía en el proceso de fabricación y la diferencia de temperatura promedio debido al efecto Joule no es relevante.

Como el efecto Joule establece que cuanto menor es la conductividad, mayor es el aumento de temperatura del conductor al pasar la misma intensidad de corriente, de la figura 6 se deduce que en general, cuando

aumenta el tiempo de envejecimiento, también aumenta la conductividad promedio de la aleación. Además, en esta se puede observar para valores altos de la corriente (mayor a 25 A), el comportamiento de la aleación que fue sometida a 6 horas de envejecimiento es la mejor desde el punto de vista eléctrico debido a que su temperatura es menor y, por consiguiente, presenta una mejor conductividad eléctrica y una menor pérdida de energía debido al efecto Joule. Otra forma de interpretar el fenómeno es la que se muestra en la figura 7, que presenta el resultado de aplicar una intensidad de corriente de  $I = 25$  A, a las diez muestras obtenidas con diferentes tiempos de envejecimiento. El gráfico muestra los cambios de temperatura que sufren las muestras después de variar el tiempo de envejecimiento en minutos durante diez diferentes tiempos: 0-18 horas.

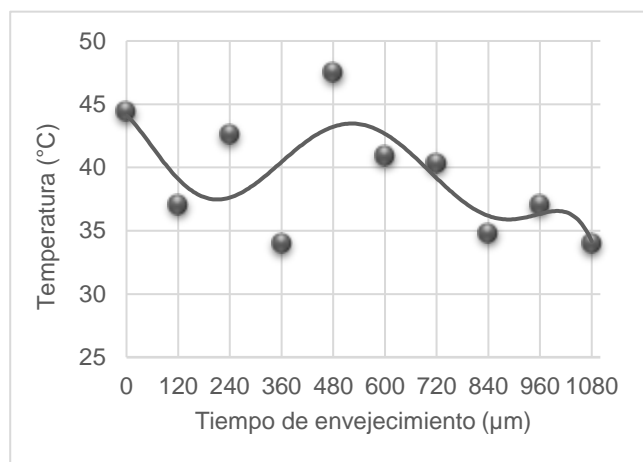


Fig. 7: Temperatura vs tiempo de envejecimiento para la prueba de corriente estática para una corriente constante de  $I=25$  A.

En la figura 7 también se muestra que el punto tratado térmicamente con un tiempo de envejecimiento de 6 h es el óptimo desde el punto de tratamiento térmico, o el más eficiente desde el punto de vista energético, porque la temperatura para el efecto Joule a la misma intensidad es la más baja de las diez muestras, como también se dedujo de la figura 7. Además, tomando como referencia el tiempo de envejecimiento de 10 horas, se puede ver en las figuras 4 y 5 que, si las dimensiones promedio del tamaño de grano disminuyen, la dureza Vickers también disminuye y de la misma manera la resistencia eléctrica (evidenciada por el aumento de la temperatura en el efecto Joule mediante la prueba de corriente estática).

## CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en el presente trabajo sobre la influencia del tiempo de envejecimiento en la aleación AA-8176 se concluye que: 1) debido al envejecimiento de la aleación, 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; 2) la realización de la prueba de corriente estática basada en la norma colombiana NTC 5786 genera resultados estándar comparables entre diferentes muestras de aleaciones de aluminio AA-8176; 3) la temperatura promedio por efecto Joule para la aleación AA-8176 disminuye con el aumento en el tiempo de envejecimiento al cual la muestra ha sido sometida; 4) el tiempo de envejecimiento cambia el carácter morfológico de la aleación AA-8176, es decir, cambia la microestructura y mejora su conductividad eléctrica; 5) el tamaño promedio de las partículas en cada muestra después de someterlas a un envejecimiento artificial es  $0.615 \mu\text{m}$ .

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo al Grupo de Investigación TESLA de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, por su apoyo en los ensayos de laboratorio y en los debates sobre las interpretaciones de los diferentes resultados.

## REFERENCIAS

- Aguilar, C., P. Rojas, S. Ordoñez y D. Guzman, *X-Ray profile analysis of Cu-8wt.%Cr processed by mechanical alloying*, Revista Matéria, v. 14, n. 2, pp. 777 - 786, (2009).
- Aitken H., M. Hartley y otros cuatro autores, *Aluminum Grounding Cable for Metal and non-Metal Sheathed Electrical Cable*, US 8124875 B2 02 de febrero (2012).
- ASTM E384 - 17: American Society for Testing Materials, *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*, Designation: E384 - 17, U.S. (2017).



- ASTM E112 - 13: American Society for Testing Materials, *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*, E112 - 13, U.S. (2015).
- ASTM B800 - 05: American Society for Testing Materials, *Standard specification for 8000 series aluminum alloys wire for electrical purposes annealed and intermediate tempers*, Designation: B800 - 05, U.S. (2011).
- Belov, N. A., A.A Aksenov, y D.G. Eskin, *Iron in Aluminum Alloys Impurity and Alloying Element*, 1ª Ed. 7-30. Taylor y Francis, Londres, Inglaterra (2002).
- Correa, R., H. Sánchez y E. García, *Study of the effect of silver in the mechanical properties and electrical conductivity of duralumins (Al-4%Cu-0.5%Mg)*, Revista DYNA, 81(186), 159-165 (2014).
- Correa, R., H. Sánchez and E. García, *Evaluación y desarrollo de la aleación Al- 4%Cu-0.5%Mg con adiciones de plata*, Tesis, Universidad de Antioquia, Colombia (2011).
- Jabłoński, M., T.A. Knych, y B. Smyrak, *Effect of iron addition to aluminum on the structure and properties of wires used for electrical purposes*, Material Science Forum, 690, 459-462 (2011).
- Jabłoński, M., T.A. Knych, y B. Smyrak, *New aluminium alloys for electrical wires of fine diameter for automotive industry*, Archives of Metallurgy and Materials, 54 (3), 672-676 (2009).
- Li, J., M. Huang y otros seis autores, *Performance comparison of AlTiC and AlTiB master alloys in grain refinement of commercial and high purity aluminum*, Transaction of Nonferrous Metal Society of China, 16, 242-253 (2006).
- Maitra, T. y S.P. Gupta, *Intermetallic compound formation in Fe-Al-Si ternary system: Part II*, Materials Characterization, 49, 293-311 (2003).
- Millán, F., Sánchez, D. y Olaya, J., *Reciclaje de aluminio: oportunidades de desarrollo en Bogotá (Colombia)*. Gestión y Ambiente 18(2): 135-152, (2015).
- NTC 5786: Norma Técnica Colombiana, *Métodos de ensayo para alambres y cables*, Bogotá-Colombia (2010).
- Peng, J., X. Tang, J. He y D. Xu, *Effect of heat treatment on microstructure and tensile properties of A356 alloys*, 3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering - IC3ME, 2103-2109 (2015)
- Rajat, K., Sujoy, K. y Siddhartha, D., *Evolution of microstructure and mechanical properties during annealing of cold-rolled AA8011 alloy*, Journal of Alloys and Compounds 468,122–129 (2009).
- Shun-cheng W., Z. Nan, Q. Wen y Z. Kai-hong, *Microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy wheels prepared by thixo-forging combined with a low superheat casting process*, Transaction of Nonferrous Metal Society of China, 24, 2214-2219 (2014).

