

## ESTUDIO DEL EFECTO DE LA PLATA EN LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA Y PROPIEDADES MECANICAS DE LOS DURALUMINIOS Al-4% Cu-0.5 Mg CON ADICIONES DE PLATA

*Reinaldo Correa*<sup>1</sup>, *Héctor Sánchez*<sup>2</sup>, *Edwin García*<sup>3</sup>

1: Ingeniero Mecánico. Master en Materiales, Universidad de Antioquia . Medellín.

2: Ingeniero Metalúrgico, Master en Materiales. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

3: Ingeniero Electricista, Doctor en Tecnología Eléctrica, Materiales Generación y Distribución. Universidad Politécnica de Valencia. España

\*Contacto: egarciaq@udea.edu.co

### RESUMEN

En este trabajo se evalúa el efecto del contenido de plata de las aleaciones base Al-Cu en la morfología de la microestructura, la resistencia a la tracción, la resistencia eléctrica y el incremento de la temperatura con el paso de la corriente eléctrica (efecto Joule). Para tal fin, fueron evaluadas las aleaciones Al-4%Cu-0,5%Mg con contenidos de plata en proporciones del 1,5%, 2,5% y 3,5%. El endurecimiento por precipitación se llevó a cabo mediante tratamientos térmicos de homogenización por solución sólida, enfriamiento rápido (temple) y envejecimiento artificial por diferentes tiempos y temperaturas. El análisis de la microestructura se realizó mediante el microscopio óptico y SEM, además, se midieron durezas Vickers, ensayos de resistencia a la tracción y pruebas de conductividad eléctrica, las cuales se compararon con la aleación A356-T6.

**Palabras Clave:** *Duraluminios, endurecimiento, homogenización, envejecimiento, efecto Joule.*

**Abstract:** This paper evaluates the effect of the silver content of the Al-Cu based alloys in the microstructure morphology, tensile strength, electrical resistance and temperature increasing with the electric current flow (Joule Effect). Therefore, the alloys were evaluated Al-4% Cu-0, 5% Mg with silver content in proportions of 1.5%, 2.5% and 3.5%. Precipitation hardening was carried out by homogenization heat treatments solid solution, rapid cooling (quenching) and artificial aging for different times and temperatures. The microstructure analysis was carried out using optical microscope and SEM also was Vickers hardness tests, tests of tensile strength and electrical conductivity tests, which were compared with the alloy A356-T6.

**Keywords:** *Alloy Al- Cu, hardening, homogenization, aging, Joule effect*

### 1 INTRODUCCIÓN

El proceso de nuevos materiales para convertirlos en productos acabados y de buena calidad está en continuo desarrollo y progreso. Por ejemplo, en el campo de los materiales de ingeniería se buscan materiales resistentes a altas temperaturas, resistentes a la corrosión, bajo peso, bajo costo, fácil conformado, que sea abundante por naturaleza, que se pueda reciclar, de larga vida útil, y con buenas propiedades conductivas, baja producción de calor al paso de la corriente

eléctrica, entre otros. Por esas razones en este trabajo se desarrolla una aleación de base aluminio, norma ANSI designación 201, con adiciones de plata por encima de los porcentajes que presenta la norma, capaces de satisfacer las propiedades antes mencionadas y las demandas que se le piden a un material estructural como es la alta resistencia mecánica y en muchas ocasiones buena conductividad eléctrica [1-2]. En este sentido estas aleaciones las reportan como las más resistentes dentro de las familias de las aleaciones base aluminio, lo que las hace muy especiales y apreciadas en la industria aeroespacial, parque automotor, en centrales hidroeléctricas y en los sistemas eléctricos de transmisión y distribución. [3-4]. Las propiedades de las aleaciones fabricadas se compararon con la aleación 356T6 que fabricadas en molde permanente pueden tener del orden de los 31ksi de resistencia a la tracción.

## **2 PROCEDIMIENTO**

### **2.1 Obtención de las aleaciones**

La fundición de las aleaciones se realizó con elementos químicamente puros, con al menos 99.9% de pureza, a la temperatura convencional de 750°C en un laboratorio de fundición. Para propósitos de este trabajo se fabricaron tres aleaciones, con 1,5%, 2,5% y 3,5% de Ag. Una vez obtenidas las muestras, se analizó su composición química por espectrometría, arrojando los siguientes datos:

**Tabla 1.** Composición química de las aleaciones fabricadas con 1,5%, 2,5% y 3,5% de Ag.

<b>Aleación Al-4%Cu-0,5%Mg</b>	<b>1,5% Ag</b>	<b>2,5% Ag</b>	<b>3,5% Ag</b>
<b>Al</b>	<b>94,030</b>	<b>94,140</b>	<b>94,54</b>
<b>Si</b>	<b>0,307</b>	<b>0,061</b>	<b>0,311</b>
<b>Fe</b>	<b>0,155</b>	<b>0,141</b>	<b>0,256</b>
<b>Cu</b>	<b>4,855</b>	<b>4,985</b>	<b>4,151</b>
<b>Mg</b>	<b>0,627</b>	<b>0,634</b>	<b>0,64</b>
<b>Ag</b>	<b>1,5</b>	<b>2,5</b>	<b>3,5</b>

Para las aleaciones mostradas en la Tabla 1, se prepararon muestras de 10x10x5 mm de cada una de ellas y fueron homogenizadas en horno mufla a 520°C, durante 40 horas, templadas en agua a temperatura ambiente y luego envejecidas a tiempos distintos (0 h, 0,5 h, 1,0 h, 1,5 h, 2,0 h, 2,5 h, 3,0 h, 3,5 h, 4,0 h, 4,5 h, 5,0 h y 5,5 h) y a temperaturas de 180°C, 200°C y 220°C, con el fin de obtener las durezas Vickers y su resistencia a la tracción para cada tiempo de envejecimiento. Posteriormente las muestras fueron preparadas metalográficamente mediante desbaste gradual con lijas y pulidas a espejo en felpa. Para realizar las mediciones de dureza Vickers se utilizó un micro-durómetro con una carga de 100 gf, y un indentador de diamante. Luego las muestras fueron atacadas con reactivo Keller, para su observación en el microscopio electrónico de barrido (SEM).

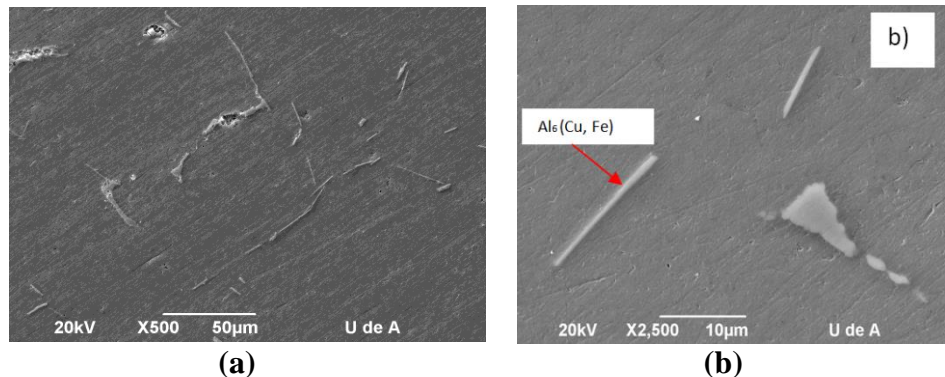
## 2.2. Medidas eléctricas

Las medidas de la conductividad eléctrica se realizaron con un equipo Modelo 4200-SCS “*Semiconductor Characterization System*”, el cual da una alta sensibilidad de la medida y una gran exactitud. Para esto las cuatro probetas se fabricaron con igual geometría y dimensiones. Por otra parte la medida de la temperatura respecto al paso de corriente se realizó con una cámara termográfica.

## 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Análisis de las microestructuras mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM - EDS).

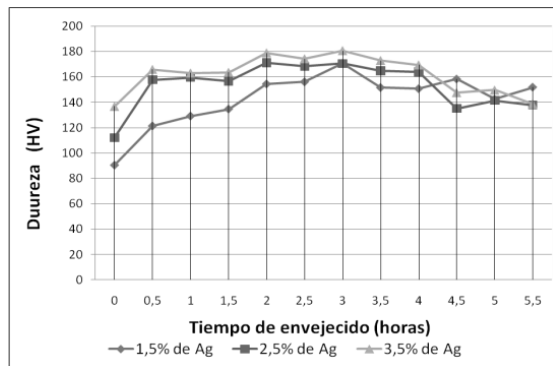
La figura 2, muestra la micrografía SEM de la aleación Al- 4%Cu- 0,5%Mg- 3,5%Ag con tratamiento térmico de homogenizado a 520°C por 40 horas, templadas en agua a temperatura ambiente y luego envejecidas a 180°C por 4 horas. En las imágenes se observa claramente una estructura formada por trozos de bordes de granos dispersos en la matriz como precipitados, esto como resultado del tratamiento térmico de homogenización y envejecimiento, donde  $\theta$  se disuelve en  $\alpha$ , según el diagrama de fase Al- Cu, dándose así una matriz dura y un material con buenas propiedades mecánicas, teniéndose como resultado un duraluminio.



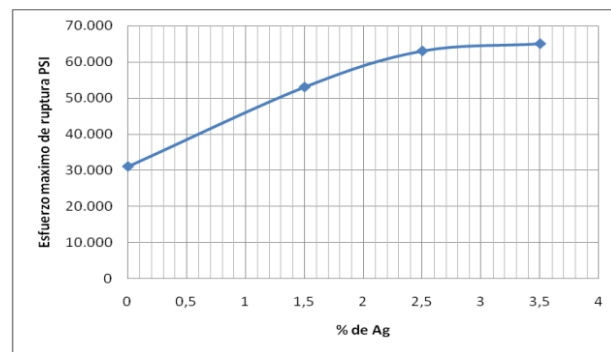
**Figura 2.** a) Micrografía de las aleaciones Al- 4%Cu- 0,5%Mg- 3,5% Ag con tratamiento térmico. Micrografías de las fases formadas en las aleaciones Al- 4%Cu- 0,5%Mg- 3,5%Ag, con tratamiento térmico. La figura b) muestra las micrografías SEM de la aleación Al- 4%Cu- 0,5%Mg con 3,5% de Ag donde se observan claramente las fases (precipitados)

### 3.2 Resultados y análisis de dureza y resistencia a la tracción

Los resultados obtenidos mediante las pruebas de durezas Vickers y resistencia a la tracción para las muestras de las aleaciones con 1,5%, 2,5% y 3,5% de Ag, homogenizadas a 520°C por 40 horas, enfriadas en agua a temperatura de 18°C y envejecidas a 180°C por diferentes tiempos, se observan en la figura 3 a) y 3 b) respectivamente.



(a)



(b)

**Figura 3 a)** Curvas de durezas Vickers Vs el tiempo de envejecido para las aleaciones Al-4%Cu-0,5Mg con 1,5%, 2,5% y 3,5% de Ag. **Curvas de resistencia a la tracción de las aleaciones Al-4%Cu-0.5Mg con 0%, 1.5%, 2.5% y 3.5% Ag. b)** Curvas de resistencia a la tracción de las aleaciones Al-4%Cu-0.5Mg con 0%, 1.5%, 2.5% y 3.5% Ag.

Las figuras 3 a) y 3 b) muestran las curvas de dureza y de resistencia a la tracción respectivamente, de las aleaciones Al-4%Cu-0.5Mg con 1.5%, 2.5% y 3.5% de Ag, donde se observa que la adición de la plata, promueve una mayor dureza y resistencia del material a todas las temperaturas de envejecido artificial. Así mismo, resaltan que el aumento exagerado de la temperatura de envejecido disminuye el pico de dureza y resistencia máxima [5]. Como se puede observar en la curva de la figura 3b)

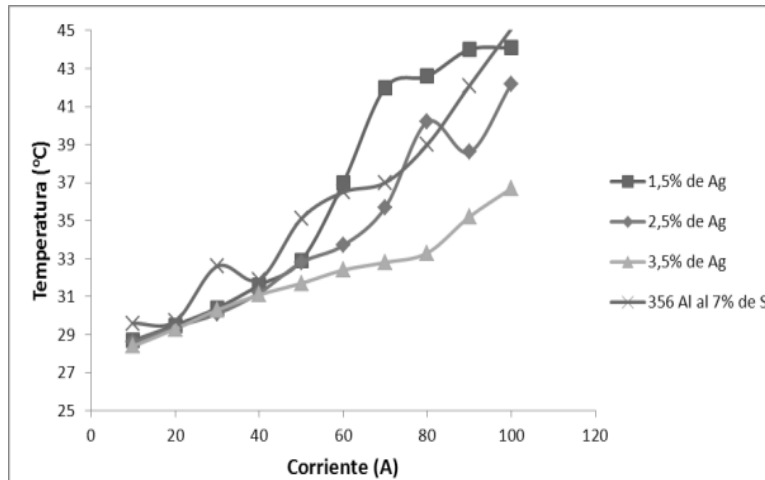
### 3.3 Resultados y análisis de la conductividad eléctrica

Al agregar plata en los duraluminios estos ven afectados su conductividad eléctrica tal y como se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2.** Resistencia eléctrica de los duraluminios a una temperatura ambiente de 22,8 °C.

CONTENIDO DE Ag EN EL DURALUMINIO 201.2-T6	DIÁMETRO DE LA PROBETA (mm)	RESISTENCIA ELÉCTRICA (mΩ/cm)
A356-T6 – Al al 7% de Si	12,0	2,56
1,5% de Ag	11,8	2,68
2,5% de Ag	11,7	1,35
3,5% de Ag	12,0	0,36

En la tabla 2, se ve como al aumentar la proporción de plata en la aleación, incrementa también la conductividad (o disminuye la resistencia eléctrica). Evidentemente, las impurezas deberán formar parte de la estructura cristalina sustituyendo al correspondiente átomo del aluminio o metal base. En consecuencia, el método para obtener electrones para el transporte de electricidad consiste en añadir impurezas al semiconductor o doparlo.



**Figura 4.** Curvas de temperatura Vs. corriente para las cuatro muestras de las aleaciones: 1,5% de Ag, 2,5% de Ag, 3,5% de Ag y 356.

El comportamiento presentado en la figura 4, se debe principalmente a la influencia de la resistencia de cada material sobre la temperatura.

#### 4 CONCLUSIONES

- Con tiempos de homogenización de 100 horas en adelante se alcanza una estructura ideal, ya que se logra disolver los precipitados grandes que pueden ser causantes de concentración de esfuerzos, pero ocurre el fenómeno de crecimiento y recristalización de grano y por ende se presenta caída de dureza y fragilidad en el material.
- Según las curvas de envejecido de las aleaciones desarrolladas en el presente trabajo, la mayor dureza y la máxima resistencia a la tracción, se consiguió con una homogenización de 520°C por 40 horas y un envejecido a 180°C en tiempos entre 4 y 6 horas.
- Según las curvas de envejecido, se presentó la mayor dureza y la máxima resistencia a la tracción en la aleación con mayor contenido de porcentaje de plata (Al-4%Cu-0.5%Mg-3.5%Ag).
- Según el análisis EDS realizado en la matriz de las aleaciones Al-4%Cu-0,5%Mg con adiciones de plata, tratadas térmicamente, se confirmó que la plata y el magnesio se disuelven en la matriz y cuya composición química fue 91.83%Al-3.38%Cu-0.67%Mg-4.12%Ag (% peso).
- Los precipitados encontrados en la aleación Al-4%Cu-0.5%Mg con adiciones de plata, homogenizada a 520°C por 40 horas y envejecida a 180°C por 4 horas, fueron los siguientes:  $\text{CuAl}_2$  ( $\theta$ ),  $\text{Al}_6(\text{Cu,Fe})$ ,  $\text{AlCu}_2\text{Fe}$ .
- La aleación con mayor porcentaje de contenido de plata, presentó mejor conductividad eléctrica y menor calentamiento con el paso de corriente eléctrica.

- Las aleaciones con contenidos de Ag por encima de 1.5%, presentan mejor conductividad eléctrica que las aleaciones A356-T6.

## **5. REFERENCIAS**

1. Teleshov, V., Et al. "Effect of chemical composition on the strength of alloys o the Al-Cu-Mg-Ag system after heating at 180 – 210°C". *Metal Science and Heat treatment*. Vol. 48, No. 3-4, pp. 104-112. March 2006.
2. Ber, L. B.; Teleshov, V.V. and Ukolova, O. G. "Aluminum and high – temperatura allos. Phase composition and mechanical properties of wrought aluminum alloys of the sistem Al-Cu- Mg-Ag-Xi ". *Metal science and treatment*. Vol. 50 N° 5-6. p. 220-227. Mayo 2008.
3. Min, S., Et al. "Effect of Ce on the termal stability of the  $\Omega$  phase in an Al-Cu-Mg-Ag alloy". *Rare metals*. Vol. 28, N° 2, pp. 156-159. April 2009.
4. Xiao, D., Ding, J. and Chen, S. "Effect of Cu content on the mechanical properties of an Al-Cu-Mg-Ag alloy". *Journal of alloys and compounds*. vol. 343 (1-2), pp. 77-78, 2002.
5. Ber, L., Et al. "Aluminum and high – temperatura allos Phase composition and mechanical properties of wrought aluminum alloys of the sistem Al-Cu-Mg-Ag-Xi". *Revista Metal science and treatment*. Vol. 50 N° 5-6, pp 220-227. Mayo 2008.
6. Ber, B., Et. al. "Phase Composition and Mechanical Properties of Wrought Aluminum Alloys of the System Al-Cu-Mg-Ag-Xi". *Metal Science and Heat Treatment*. Vol. 50, No 5, pp. 220-227, 2008.