

**ESTUDIO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENDURECIMIENTO POR  
PRECIPITACIÓN DE ALEACIONES Al-Cu PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN  
COMO SOPORTE GUÍA EN CIRUGÍA ORTOPÉDICA**

**JENNY MARCELA RUIZ CELIS  
MARIA DURLEY VILLABONA ALMEYDA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2014**

**ESTUDIO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENDURECIMIENTO POR  
PRECIPITACIÓN DE ALEACIONES Al-Cu PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN  
COMO SOPORTE GUÍA EN CIRUGÍA ORTOPÉDICA**

**JENNY MARCELA RUIZ**

**MARIA DURLEY VILLABONA**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Metalúrgico**

**DIRECTOR**

**Ph.D. SANDRA JUDITH GARCIA VERGARA**

**CO-DIRECTOR**

**Ing. Ricardo Andres García Vergara**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES**

**BUCARAMANGA**

**2014**

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	14
1. OBJETIVOS.....	15
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	15
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2. MARCO TEÓRICO .....	16
2.1. ALUMINIO Y SUS ALEACIONES .....	16
2.2. ALEACIONES DE ALUMINIO- COBRE .....	17
2.3. TRATAMIENTO TÉRMICO.....	19
2.3.1. Tratamiento térmico por solución.....	19
2.3.2. Temple.....	19
2.3.3. Envejecido. ....	20
2.4. OBTENCIÓN DE PRECIPITADOS DE <i>Al2Cu</i> .....	21
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	23
3.1. ALEACIONES ESTUDIADAS .....	24
3.2. TRATAMIENTO TÉRMICO.....	24
3.3. EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS .....	27
3.3.1. Dureza. ....	27
3.3.2. Ensayo de Tracción. ....	27
3.4. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL .....	28
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	29
4.1. ANÁLISIS QUÍMICO .....	29
4.2. DUREZA .....	30

4.3. ENSAYO DE TRACCIÓN .....	35
4.4. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL .....	37
5. CONCLUSIONES .....	43
6. RECOMENDACIONES.....	45
BIBLIOGRAFÍA.....	48
ANEXO	50

## LISTA DE TABLA

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Temperaturas de solución sólida para cada aleación. ....	25
Tabla 2. Nomenclatura de las aleaciones tratadas térmicamente.....	26
Tabla 3. Composición química de dos aleaciones Al-Cu objeto de estudio.....	29
Tabla 4. Dureza en escala HRF para aleaciones sin tratamiento térmico. ....	31
Tabla 5. Dureza en escala HRF de la aleación Al-4,5%Cu en peso con tratamiento térmico. ....	31
Tabla 6. Dureza en escala HRF de la aleación Al-5%Cu en peso con tratamiento térmico. ....	32
Tabla 7. Resistencia a la tracción de aleaciones Al-Cu a un tiempo de envejecimiento de 8 horas a diferentes temperaturas. ....	35

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de equilibrio de fases Al - Cu.....	18
Figura 2. Efecto del tratamiento térmico en una estructura de duraluminio .....	21
Figura 3. Esquema de metodología. ....	23
Figura 4. Curva Dureza-Tiempo de envejecimiento a diferentes temperaturas. a). Aleación con 4.5%Cu en peso. b). Aleación con 5%Cu en peso. ....	34
Figura 5. Curva esfuerzo-deformación para la aleación con 4.5%Cu en peso sin tratamiento térmico y con envejecimiento artificial durante 8 horas a diferentes temperaturas.....	36
Figura 6. Curva esfuerzo-deformación para la aleación con 5pt Cu sin tratamiento térmico y con envejecimiento artificial durante 8 horas a diferentes temperaturas.....	37
Figura 7. Micrografías ópticas de las aleaciones sin tratamiento térmico. 50x. a.) Al-4,5%Cu en peso y b.) Al-5%Cu en peso. ....	38
Figura 8. Micrografías ópticas de las aleaciones tratadas térmicamente a un envejecido a 150°C durante 8 horas. 50x. a .....	39
Figura 9. Micrografías ópticas de las aleaciones tratadas térmicamente a un envejecido a 200°C durante 8 horas. 50x. a.) Al-4,5%Cu en peso y b.) Al-5% Cu en peso.....	39
Figura 10. Micrografías ópticas de las aleaciones tratadas térmicamente a un envejecido a 250°C durante 8 horas. 50x. a.) Al-4,5%Cu en peso y b.) Al-5% Cu en peso.....	39
Figura 11. Micrografías electrónicas de la aleación de Al-5%Cu en peso. a). Sin tratamiento térmico y b). Con tratamiento térmico de envejecimiento a 250°C por 8 horas.....	41

Figura 12. Micrografía electrónica de la aleación de Al-4.5%Cu en peso, con tratamiento térmico de envejecimiento a 250°C por 8 horas. ....41

Figura 13. Espectros EDS de la aleación Al-4,5%Cu en peso, tratada térmicamente a un envejecido de 250°C durante 8 horas. a). Matriz compuesta principalmente de aluminio, b). Productos de corrosión c). Precipitados de color blanco en forma de agujas.....42

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A.. Fundición.....	50
Anexo B. Resultados Ensayo De Tracción.....	52
Anexo C. Resultado EDS de microscopía electrónica de barrido (SEM) .....	60
Anexo D. Variación Porcentual de Propiedades Mecánicas.....	64

## RESUMEN

**TÍTULO:** TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACIÓN DE DOS ALEACIONES Al-Cu PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN COMO SOPORTE GUÍA EN CIRUGÍA ORTOPÉDICA.

**AUTORES:** RUIZ CELIS Jenny Marcela; VILLABONA ALMEYDA Maria Durley\*\*.

**PALABRAS CLAVES:** Tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación, aleaciones Al-Cu, resistencia a la tracción, dureza.

### DESCRIPCIÓN

El objetivo del presente estudio fue aplicar un tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación a dos aleaciones de Al-Cu, para su potencial aplicación como soporte guía en cirugía ortopédica. Para esto se obtuvieron dos aleaciones de Al-Cu mediante un proceso de fundición con porcentajes de cobre de 4,5%p y 5%p respectivamente. A estas aleaciones se les realizó un tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación con una temperatura de solución sólida de 425° para la aleación con 4,5%p Cu y 450°C para la aleación con 5%p Cu, posteriormente se les realizó un temple en agua y finalmente se llevaron a diferentes temperaturas de envejecido (150°, 200° y 250°C), a diferentes tiempos de permanencia (2, 4, 6 y 8 horas). Para determinar con cuales condiciones de las que se plantearon, se obtenían las mejores propiedades mecánicas.

Mediante ensayos de tracción y dureza se pudo corroborar que el tratamiento térmico aplicado aumentaba las propiedades mecánicas de estas aleaciones. Obteniendo que a mayor temperatura y tiempo de envejecido, mayor era el porcentaje de aumento en las aleaciones. El análisis de los precipitados obtenidos con el tratamiento térmico se realizó mediante MO, SEM y EDS. Arrojando que se obtuvieron un tipo de precipitados, el cual por su alto contenido de hierro y cobre se clasificó como  $Cu_2FeAl_7$ .

La primera aleación, la cual contiene un 4,5%p Cu aumentó su dureza en un 169% y la resistencia a la tracción 81%; la segunda con un contenido de cobre de 5%p aumentó 55% en su dureza y 50% en la resistencia a la tracción. Esta mejora de las propiedades mecánicas indica que el tratamiento aplicado fue efectivo para estas composiciones, debido a la formación de precipitados.

---

\* Proyecto de Grado.

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: PhD. Sandra Judith García Vergara. Codirector: Ing. Ricardo Andrés García Vergara.

## ABSTRACT

**TITLE:** HEAT TREATMENT OF HARDENING THROUGH PRECIPITATION OF TWO ALLOYS Al-Cu FOR POTENTIAL IMPLEMENTATION AS SUPPORT GUIDE TO ORTHOPEDIC SURGERY\*

**AUTHORS:** RUIZ CELIS Jenny Marcela; Maria Almeyda VILLABONA Durley\*\*.

**KEYWORDS:** Heat treatment of hardening through precipitation, Al- Cu alloys, tensile strength, hardness.

### DESCRIPTION

The aim of this study was to apply a heat treatment of hardening through precipitation of two alloys Al-Cu, for potential application as support guide in orthopedic surgery. These two alloys Al- Cu were obtained using a casting process with copper percentages of 4.5% w and 5%w respectively. These alloys were subjected to a heat treatment of hardening through precipitation whit a solid solution temperature of 425° for the alloy with 4.5%w Cu and 450°C for the alloy with 5% w Cu, subsequently they are water quench and aged at different temperatures (150°, 200° and 250°C) at different residence times (2, 4, 6 and 8 hours). To determine which of the planed conditions obtained the best mechanical properties.

Through tensile and hardness tests we could corroborate that heat treatment increased the mechanical properties of these alloys. Obtaining that the higher the temperature and aging time, the greater the increase percentage in the alloys. The analysis of the obtained precipitates by heat treatment was performed through MO, SEM and EDS. Finding a precipitate type, which is classified as  $Cu_2FeAl_7$  due to its high iron and copper content.

The first alloy, which contains 4.5% w Cu hardness increased by 169% and the tensile strength 81%; the second with a copper content of 5% w 55% increased in hardness and 50% in the tensile strength. This improvement of the mechanical properties indicating that the treatment applied to these compositions was effective due to the formation of precipitates.

---

\* Bachelor thesis

\*\* School of Physics and Chemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director PhD. Judith García Sandra Vergara. Co-director: Engineer Ricardo García Andrés Vergara.

## INTRODUCCIÓN

Debido a la necesidad de mejorar la calidad de vida de las personas, se ha hecho necesaria la investigación y utilización de nuevos biomateriales con el fin de obtener mejores resultados en los dispositivos usados por los pacientes; para ello se analizan los materiales ya existentes, en busca de mejorar sus propiedades biomédicas mediante diferentes procesos.

Dentro de los materiales de interés para aplicaciones biomédicas se encuentra el duraluminio, el cual podría llegar a sustituir al acero inoxidable usado para fabricar soportes guía en cirugía de ortopedia, debido a su ligereza. Sin embargo, sus propiedades mecánicas no alcanzan a compararse con las del acero inoxidable; para esto es necesaria la aplicación de tratamientos térmicos para el mejoramiento de las mismas. El tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación es el usado para este tipo de aleación, el cual busca la formación de precipitados de tipo  $\text{CuAl}_2$  en una matriz de aluminio, mejorando las propiedades mecánicas de este material.

En el presente trabajo de investigación, se buscó mejorar las propiedades mecánicas de dos aleaciones de duraluminio con diferente porcentaje en cobre (4.5 y 5 %Cu en peso) mediante la aplicación del tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación, en donde se variaron las temperaturas de envejecimiento, siendo estas de 150, 200 y 250°C. Con esto se obtuvo un mejoramiento en su dureza y resistencia a la tracción, mediante la aparición de precipitados de tipo  $\text{CuAl}_2$  y  $\text{Cu}_2\text{FeAl}_7$ . Para ambas aleaciones las condiciones con las que se obtuvieron mejores resultados fueron: tratamiento térmico de solución a 525°C por 2 horas, temple agua y envejecido de 250°C durante 8 horas.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Aplicar un tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación a dos aleaciones Al-Cu, para su potencial aplicación como soporte guía en cirugía ortopédica.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar y realizar el tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación de dos aleaciones Al-Cu, variando el contenido de cobre
- Medir las propiedades mecánicas adquiridas durante el tratamiento térmico, mediante el ensayo de dureza y el ensayo de tracción.
- Identificar las condiciones óptimas para el tratamiento térmico de cada aleación, que permita obtener las mejores propiedades mecánicas.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. ALUMINIO Y SUS ALEACIONES**

Las aleaciones de aluminio son unos de los principales materiales utilizados en la industria moderna, debido a su buena combinación de propiedades, las cuales hacen a estas aleaciones útiles en diversos campos de aplicación. En general, sus propiedades son: baja densidad, resistencia a la corrosión, buena conductividad eléctrica, ductilidad, maleabilidad, entre otras. Estas propiedades pueden variar dependiendo del tipo de elemento aleante que se utilice para hacer la aleación [1].

Las aleaciones de aluminio se pueden dividir en dos grupos dependiendo del aleante que se use: las tratables térmicamente para darles mayor resistencia, y las no tratables térmicamente, cuya resistencia sólo puede aumentarse trabajándolas en frío. En las primeras, la mejora de las propiedades se da por medio de la adición de elementos aleantes, los cuales actúan a través de tres mecanismos de endurecimiento: por solución sólida, por dispersión y por precipitación. Y en las segundas, sus propiedades se puede dar por medio de trabajo en frío, dónde la deformación de los cristales fortalece la resistencia del material. Las aleaciones de aluminio fundidas, incrementan sus propiedades usando el primer sistema, mientras la forjadas lo pueden hacer por cualquiera de los dos o con una combinación de ellos. Los métodos usados para llevar a cabo estos mecanismos son el fortalecimiento del tamaño de grano, el trabajo en frío y el endurecimiento por precipitación, siendo éste último el más usado [2].

Las aleaciones de aluminio no tratables térmicamente corresponden a aquellas cuyo principal aleante es aluminio (99%), manganeso, silicio o magnesio; mientras

las tratables térmicamente son las que tienen cobre, magnesio y silicio o zinc como mayor componente [2].

Para que una aleación sea considerada como endurecible por precipitación debe cumplir con los siguientes requisitos:

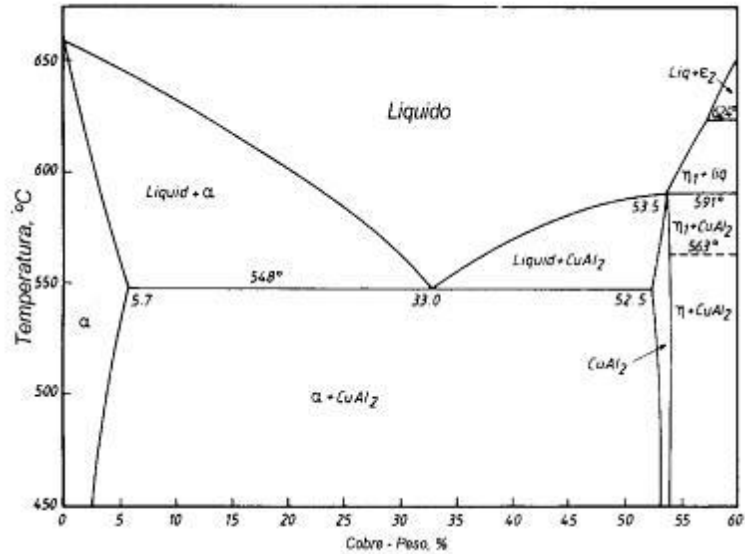
- La solubilidad sólida, línea de solvus, de los principales elementos aleantes debe disminuir con la temperatura.
- La zona de solvus de Guiner-Preston, GP, debe ser suficientemente alta para formar zonas GP en un tiempo razonable [2].

## **2.2. ALEACIONES DE ALUMINIO- COBRE**

El cobre como principal elemento aleante del aluminio produce un aumento de dureza y se obtiene una buena combinación de propiedades mecánicas (aumento en la resistencia a la tracción), sin embargo, se disminuye la resistencia a la corrosión. En general, la cantidad de cobre presente en ésta aleación no supera el 15%, pues a partir de ésta concentración se forman compuestos inter-metálicos que hacen frágil el material [3].

Éste tipo de aleaciones corresponden al grupo 2xxx, son tratables térmicamente y son muy utilizadas en partes estructurales de aviones, automóviles [4] y como fijadores externos en la consolidación de fracturas en los huesos.

**Figura 1. Diagrama de equilibrio de fases Al - Cu**



**Fuente:** Aparicio, Manero, Rodríguez, Arandes, Planell, Aleaciones Ligeras, Barcelona: Ediciones Upc, 2001. P. 23-32

En la Figura 1 se muestra el diagrama de fases Al-Cu, dónde está presente la fase  $\alpha$ , que es una solución sólida de cobre en aluminio que cristaliza en la red cúbica centrada en las caras. La fase eutéctica, correspondiente a una temperatura de 547 °C y 33% Cu, está formada por cristales de cobre en aluminio ( $Al_2Cu$ ) incrustados en la matriz de la solución sólida.

La solubilidad del cobre en el aluminio varía del 0,45% en peso a 300°C, hasta 5,7% porcentaje en peso a 547°C, lo que se utiliza para el temple de precipitación a que puede ser sometida estas aleaciones. El cobre endurece mucho el aluminio, por lo que estas aleaciones poseen propiedades mecánicas excepcionales, pero mantienen la buena maquinabilidad y ligereza que posee el aluminio. En general, estas aleaciones, se caracterizan por una buena resistencia al calor y una menor resistencia a los agentes atmosféricos que las aleaciones sin cobre.

Aunque ésta aleación tiene buenas propiedades, siempre se busca por diversos métodos mejorarlas, para así abarcar nuevos campos de aplicación. Generalmente para éste tipo de material, suele aplicarse un tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación que consta de tres etapas: solubilización, temple y envejecimiento [2].

### **2.3. TRATAMIENTO TÉRMICO**

El endurecimiento por precipitación incluye solubilización, temple y envejecido, usado para aleaciones tratables térmicamente, como lo son las de la serie 2xxx. Este proceso consta de tres etapas:

**2.3.1. Tratamiento térmico por solución.** Consiste en la disolución de constituyentes y compuestos inter-metálicos para formar una solución sólida, donde se tiene la máxima solubilidad de los elementos aleantes. Para obtenerla, se incrementa la temperatura de la aleación  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  por encima de la línea de solvus (depende del % de Cu). No es conveniente alcanzar la temperatura eutéctica, pues se crea una fusión indeseada que disminuye las propiedades mecánicas. El tiempo de sostenimiento debe ser el mínimo requerido para permitir que la solución sea completa, es decir, para que haya una homogenización total. Depende de las dimensiones de la pieza y de la disolución de los compuestos inter-metálicos [6].

**2.3.2. Temple.** Es una de las etapas más críticas y tiene como objeto preservar la solución sólida sobresaturada y las vacancias generadas en la etapa anterior. Depende principalmente de la composición de la aleación. Las desventajas del temple radican en la presencia de tensiones residuales y distorsión en la pieza. Ésta etapa puede ser controlada con la temperatura de temple y el medio de enfriamiento.

En la mayoría de las aleaciones es importante llevar la pieza recocida, sobre todo aquellas que tienen paredes delgadas con pequeña capacidad calorífica lo más rápido posible al baño de enfriamiento, ya que cualquier demora influye desfavorablemente sobre la resistencia mecánica y también sobre la resistencia a la corrosión [6].

**2.3.3. Envejecido.** Es el proceso de tratamiento térmico para producir un precipitado coherente, el cual consiste en provocar la aparición de un precipitado finamente dividido de una segunda fase, en la matriz monofásica de una aleación que es una solución sólida sobresaturada.

Algunos sistemas tienden espontáneamente a llegar al equilibrio, es decir, sus átomos se empiezan a mover para expulsar el exceso del elemento que se encuentra en solución, mediante la formación de pequeños precipitados. Este fenómeno es conocido como envejecimiento natural [6].

Pero en los demás sistemas no se da el envejecido por precipitación, por lo cual, es necesario forzar este proceso de precipitación mediante tratamientos a elevadas temperaturas. Este tratamiento consiste en someter el material a un recocido a una temperatura por debajo de la curva de transformación para inducir la precipitación. A este tratamiento se le denomina, envejecimiento artificial.

Al realizar los tratamientos de forma adecuada, es posible controlar el tamaño y partículas que se precipitarán y así predecir las propiedades mecánicas finales de esta aleación [5].

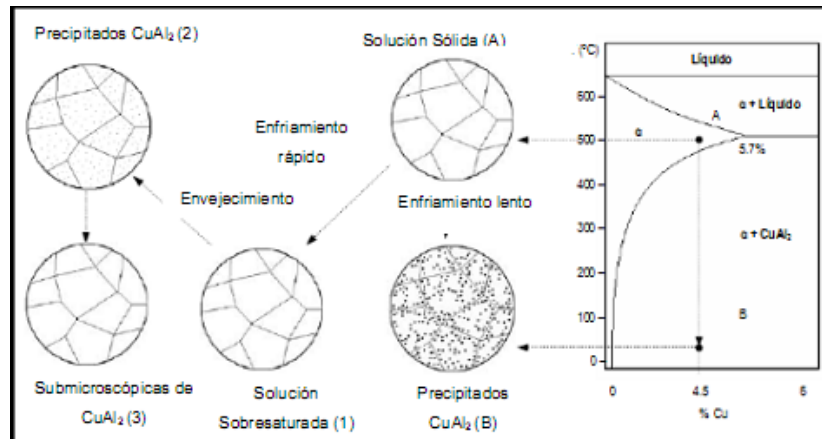
Cuando se le aplica tratamiento térmico a éstas aleaciones, se forman finísimas partículas de una segunda fase en una matriz  $\alpha$  produciendo así un endurecimiento de la aleación sin alcanzar excesiva fragilidad. Se debe tener cuidado de que el material empiece el proceso de envejecido natural, debido a que

éstas aleaciones tienen esta tendencia, por lo que hay que trabajarlos justo después del temple o almacenarlos en refrigeradores cuando se les desee aplicar algún procedimiento de conformado o mecanizado [5].

## 2.4. OBTENCIÓN DE PRECIPITADOS DE $Al_2Cu$

Para describir el proceso de obtención de éstos precipitados se tomará como ejemplo una aleación Al- 4.5%Cu en peso, correspondiente a un duraluminio. Como se puede observar en la Figura 2.

**Figura 2. Efecto del tratamiento térmico en una estructura de duraluminio**



Fuente: PRINCIPIOS DEL ENVEJECIMIENTO DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO. [En línea]: <http://es.scribd.com/doc/71998492/15/Principios-del-envejecimiento-de-las-aleaciones-de-aluminio>, citada el 15 de julio de 2013.

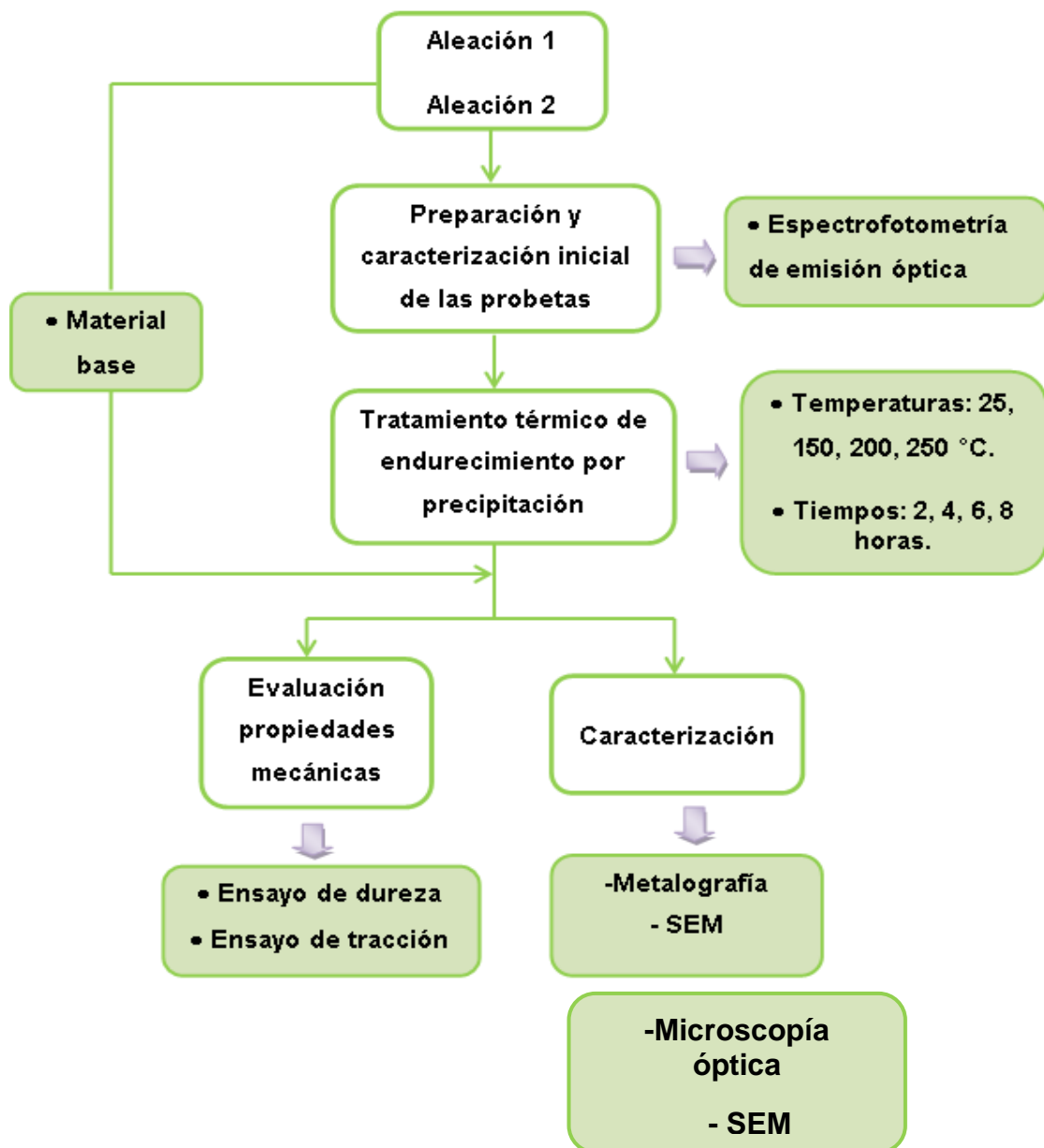
Al realizar el tratamiento de solubilización, se busca la formación de una solución sólida conocida como fase  $\alpha$ , la cual es relativamente dúctil y blanda. Luego se procede a realizar el temple en donde se busca mantener esta fase a temperatura ambiente, en donde se encuentra sobresaturada de cobre, para así endurecerla por medio de un envejecido en donde se forman finísimas partículas de una segunda fase en la matriz de  $\alpha$ . El proceso es complicado, pues hay varios precipitados intermedios antes de llegar al precipitado de equilibrio final que es  $\theta$ .

De hecho, las mejores propiedades mecánicas en términos de buen compromiso entre dureza y ductilidad, se logra con uno de los precipitados intermedios; de esta manera, cuando aparece tal precipitado, hay que detener el tratamiento. Si se continúa con el tratamiento térmico, el material disminuye significativamente su dureza y entonces se habla de sobre-envejecimiento [7].

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En la Figura 3 se presenta el esquema con la metodología seguida para la ejecución del presente trabajo.

Figura 3. Esquema de metodología.



### **3.1. ALEACIONES ESTUDIADAS**

Los materiales objeto de estudio corresponden a dos aleaciones de Aluminio-Cobre que se obtuvieron usando como guía un proyecto de grado anterior desarrollado en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander, cuyo objetivo era la fabricación de un duraluminio con contenido de cobre en el rango de 4.3-4.8% en peso [8].

Las muestras se obtuvieron por fundición en Laboratorio de Fundición de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander bajo las condiciones indicadas en el Anexo A. La composición de cada aleación, fue obtenida por espectrofotometría de emisión óptica usando el Espectrofotómetro de emisión óptica Q4TASMA del Laboratorio de Espectroscopía, sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

### **3.2. TRATAMIENTO TÉRMICO**

Las muestras de las aleaciones objeto de estudio, se les aplicó un tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación usando un horno marca CARBOLITE CWF 1200, sin atmósfera controlada, con una velocidad de calentamiento de 10°C/min. Procedimiento llevado a cabo en el Laboratorio GIC, sede Guatiguará, Universidad Industrial de Santander.

Las muestras de cada aleación se llevaron hasta la temperatura de solución sólida correspondiente (Tabla 1) durante un lapso de 2 horas, luego se les realizó un temple en agua a temperatura ambiente. Posteriormente se aplicó un envejecimiento artificial a diferentes condiciones de temperatura y tiempo. El rango de temperaturas se seleccionó teniendo en cuenta anteriores estudios (150-250 °C) [12]. De allí se escogieron tres isotermas: 150, 200, 250 °C, durante tiempos

de sostenimiento de 2, 4,6 y 8 horas para cada una de estas temperaturas y para ambas aleaciones.

**Tabla 1. Temperaturas de solución sólida para cada aleación.**

<b>%Cu en peso</b>	<b>Temperatura Solubilización °C</b>
<b>4.5</b>	<b>525</b>
<b>5</b>	<b>550</b>

La temperatura de solubilización corresponde a aquella en la cual se tiene una solución sólida saturada y se determina de acuerdo al contenido de cobre en cada una de las aleaciones usando el diagrama binario Al-Cu. A pesar del significativo contenido de hierro presente en las muestras, éste no se tiene en cuenta para la determinación de la temperatura, ya que para éstas aleaciones no es considerado una aleante sino una impureza [11]. Las 2 horas de sostenimiento en la temperatura de solubilización se estableció con base en estudios anteriores que indican que éste tiempo es suficiente para obtener una solución sólida de Al-Cu [11]

Ya que con un enfriamiento lento no es posible conservar el material en solución sólida, pues el material tiende a formar las fases que se tenían inicialmente, por eso se hace necesario un enfriamiento rápido, para lo cual se usó agua a temperatura ambiente teniendo en cuenta que es un medio adecuado debido a que su coeficiente de transferencia de calor es elevado [12].

Teniendo en cuenta que las aleaciones de aluminio-cobre tienden a envejecer naturalmente, las muestras se mantuvieron refrigeradas entre 0-5°C para disminuir la formación de precipitados.

Las condiciones de envejecido se determinaron al consultar tanto libros como artículos en los cuales se encontraron que el rango de temperatura para que se formaran los precipitados, en aleaciones con composición similar a la estudiada en ésta investigación, es de 150 a 300°C durante tiempos de sostenimiento entre 1 y 48 horas.

Las condiciones seleccionadas se tomaron teniendo en cuenta que a esas temperaturas y tiempos de sostenimiento se obtenía una mejora en las propiedades mecánicas. Pues para tiempos y temperaturas superiores, se presentaba un fenómeno de sobre-envejecido en donde decaen las propiedades del material.

La Tabla 2 muestra la nomenclatura utilizada para la identificación de las aleaciones tratadas:

**Tabla 2. Nomenclatura de las aleaciones tratadas térmicamente.**

Grupo	%pCu	Identificación	Condición
<b>T1 (150°C)</b>	4,5	T1Y2	Al-4,5%p Cu envejecida a 150°C por 2h
		T1Y4	Al-4,5%p Cu envejecida a 150°C por 4h
		T1Y6	Al-4,5%p Cu envejecida a 150°C por 6h
		T1Y8	Al-4,5%p Cu envejecida a 150°C por 8h
	5	T1Z2	Al-5%p Cu envejecida a 150°C por 2h
		T1Z4	Al-5%p Cu envejecida a 150°C por 4h
		T1Z6	Al-5%p Cu envejecida a 150°C por 6h
		T1Z8	Al-5%p Cu envejecida a 150°C por 8h
<b>T2 (200°C)</b>	4,5	T2Y2	Al-4,5%p Cu envejecida a 200°C por 2h
		T2Y4	Al-4,5%p Cu envejecida a 200°C por 4h
		T2Y6	Al-4,5%p Cu envejecida a 200°C por 6h
		T2Y8	Al-4,5%p Cu envejecida a 200°C por 8h

Grupo	%pCu	Identificación	Condición
	5	T2Z2	Al-5%p Cu envejecida a 200°C por 2h
		T2Z4	Al-5%pCu envejecida a 200°C por 4h
		T2Z6	Al-5%pCu envejecida a 200°C por 6h
		T2Z8	Al-5%pCu envejecida a 200°C por 8h
T3 (250°C)	4,5	T3Y2	Al-4,5%pCu envejecida a 250°C por 2h
		T3Y4	Al-4,5%pCu envejecida a 250°C por 4h
		T3Y6	Al-4,5%pCu envejecida a 250°C por 6h
		T3Y8	Al-4,5%pCu envejecida a 250°C por 8h
	5	T3Z2	Al-5%pCu envejecida a 250°C por 2h
		T3Z4	Al-5%p Cu envejecida a 250°C por 4h
		T3Z6	Al-5%p Cu envejecida a 250°C por 6h
		T3Z8	Al-5%p Cu envejecida a 250°C por 8h

(fuente: Autores)

### 3.3. EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS

**3.3.1. Dureza.** El ensayo de dureza se aplicó a probetas cuyas dimensiones correspondían a 1.5cmx1.5cmx1.5cm, utilizando un durómetro marca WILSON modelo 4TT en escala Rockwell F (Identador de 1/16 y carga de 60 Kgf). Para cada una de las condiciones de tratamiento térmico se usó una probeta, la cual fue sometida a 3 indentaciones, de tal manera que se pudiese obtener un promedio de la dureza del material.

**3.3.2. Ensayo de Tracción.** Éste ensayo se llevó a cabo en máquina de ensayos universal TIMIUS OLSEN del laboratorio de GIMAT de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica usando probetas con dimensiones de 50mmx12mmx4mm y aplicando cargas máximas entre 3000N y 8000N, con una velocidad de deformación de 1 mm por minuto.

El análisis de tracción se realizó a un total de 4 probetas por cada aleación: una sin tratamiento térmico y una por cada temperatura de envejecimiento artificial. Ésta última corresponde a aquella cuya dureza fue la mayor.

### **3.4. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL**

Tomando muestras representativas de cada aleación se realizó la caracterización por microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. Las muestras de material base se prepararon superficialmente mediante desbaste con papel abrasivo de carburo de silicio, hasta una granulometría de 600, seguido de un pulido con alúmina (0.3 y 0.05  $\mu\text{m}$ ) para obtener un acabado superficial tipo espejular.

Para revelar la microestructura de las aleaciones base, la superficie pulida fue atacada con el reactivo Keller (2,5%  $\text{HNO}_3$  – 1,5%  $\text{HCl}$  – 0,5%  $\text{HF}$  (v/v)). Adicionalmente, se realizó la caracterización microestructural de las muestras modificadas por el tratamiento térmico, que presentaron las mejores propiedades de resistencia a la tracción y dureza, con el fin de determinar la relación entre éste comportamiento y sus cambios microestructurales debidos al tratamiento aplicado.

La caracterización micro-estructural se realizó en el microscopio óptico OlympusGX71 ubicado en el Laboratorio de Metalografía, sede principal, Universidad Industrial de Santander y en el microscopio de barrido electrónico QUANTA FEG 650 equipado con EDS, que permite el análisis químico cualitativo de los precipitados obtenidos en las muestras, y que está localizado en el Laboratorio de microscopia, sede Guatiguará, Universidad Industrial de Santander.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se indican los resultados alcanzados durante la realización del presente estudio, dónde se puede observar la variación en las propiedades mecánicas de dos aleaciones Al-Cu tratadas térmicamente. Las probetas del material objeto de estudios se llevaron a un estado de solución sólida y posteriormente se sometieron a un temple y tratamiento de envejecimiento artificial.

### 4.1. ANÁLISIS QUÍMICO

En la Tabla 3 se pueden apreciar los resultados del análisis químico por espectrofotometría de emisión óptica de las aleaciones analizadas en éste estudio. Por cada composición se tomaron dos muestras (de un extremo y el centro del lingote) con el fin de observar la composición a lo largo del lingote fundido.

**Tabla 3. Composición química de dos aleaciones Al-Cu objeto de estudio.**

ELEMENTO	Aleación 1		Aleación 2	
	Extremo (%p)	Centro (%p)	Extremo (%p)	Centro (%p)
<b>Aluminio</b>	89,395	90,085	88,000	88,060
<b>Cobre</b>	4,060	5,040	4,980	5,080
<b>Silicio</b>	1,480	1,580	1,830	1,850
<b>Hierro</b>	2,530	2,030	2,680	2,900
<b>Manganeso</b>	0,096	0,100	0,100	0,140
<b>Magnesio</b>	0,005	0,005	0,010	0,010
<b>Cromo</b>	0,020	0,020	0,020	0,020

ELEMENTO	Aleación 1		Aleación 2	
	Extremo (%p)	Centro (%p)	Extremo (%p)	Centro (%p)
<b>Niquel</b>	0,020	0,020	0,020	0,000
<b>Zinc</b>	0,700	0,720	0,818	0,902
<b>Titanio</b>	0,046	0,050	0,050	0,050
<b>Cromo</b>	0,022	0,026	0,020	0,020
<b>Otros</b>	0,900	0,990	0,989	1,031

En las aleaciones se aprecian algunas macro-porosidades a pesar de haberse usado desgasificación con nitrógeno y hexacloroetano, las cuales son debidas a los gases atrapados en el material durante la fundición del mismo. Además se debe tener en cuenta que estas aleaciones presentan porosidades por naturaleza y requieren de condiciones de fusión más controladas, tanto en el horno como en la colada. Para lograr la obtención de una aleación Al-Cu con buenas características y propiedades a partir de la fundición de elementos puros se requiere un estudio más extenso y que no se encuentra en el alcance del presente trabajo.

A pesar de esto, se decidió trabajar con el material obtenido, basados en que la porosidad no hace parte de las variables objeto de estudio, pero sí determina, en la misma medida, para ambas aleaciones, las propiedades mecánicas iniciales sin afectar el incremento porcentual de éstas con el tratamiento térmico aplicado [9].

#### 4.2. DUREZA

Los resultados obtenidos durante el ensayo Rockwell para el material de estudio sin ninguna modificación se muestran en la Tabla 4. Para las dos aleaciones con

tratamiento térmico de envejecido artificial a diferentes condiciones de tiempo y temperatura, los datos se indican en la Tabla 5.

**Tabla 4. Dureza en escala HRF para aleaciones sin tratamiento térmico.**

<b>%pCu</b>	<b>Medida 1 (HRF)</b>	<b>Medida 2 (HRF)</b>	<b>Medida 3 (HRF)</b>	<b>Promedio (HRF)</b>
<b>4.5</b>	30	34	31	32
<b>5</b>	58	53	57	56

**Tabla 5. Dureza en escala HRF de la aleación Al-4,5%Cu en peso con tratamiento térmico.**

<b>150°C</b>					
<b>Identificación</b>	<b>Tiempo de permanencia (h)</b>	<b>Medida 1 (HRF)</b>	<b>Medida 2 (HRF)</b>	<b>Medida 3 (HRF)</b>	<b>Promedio (HRF)</b>
T1Y2	2	70	71	72	71
T1Y4	4	76.5	73	73	74
T1Y6	6	70	72	78	73
T1Y8	8	80	86	74	80
<b>200°C</b>					
T2Y2	2	71	62	70	68
T2Y4	4	58	79	70	69
T2Y6	6	66	85	76	76
T2Y8	8	<b>75</b>	<b>81</b>	<b>83</b>	<b>80</b>
<b>250°C</b>					
T3Y2	2	75	70	70	72
T3Y4	4	73	72	69	71
T3Y6	6	79	77	74	77
T3Y8	8	88	85	85	86

**Tabla 6. Dureza en escala HRF de la aleación Al-5%Cu en peso con tratamiento térmico.**

<b>150°C</b>					
<b>Identificación</b>	<b>Tiempo de permanencia (h)</b>	<b>Medida 1 (HRF)</b>	<b>Medida 2 (HRF)</b>	<b>Medida 3 (HRF)</b>	<b>Promedio (HRF)</b>
T1Z2	2	74	78	68	73
T1Z4	4	75	75	79	76
T1Z6	6	74	71	82	76
T1Z8	8	76	79	86	80
<b>200°C</b>					
T2Z2	2	79	75	72	75
T2Z4	4	76	75	83	78
T2Z6	6	78	76	71	75
T2Z8	8	83	82	85	83
<b>250°C</b>					
T3Z2	2	78	74	73	75
T3Z4	4	78	83	76	79
T3Z6	6	80	82	83	82
T3Z8	8	81	89	90	87

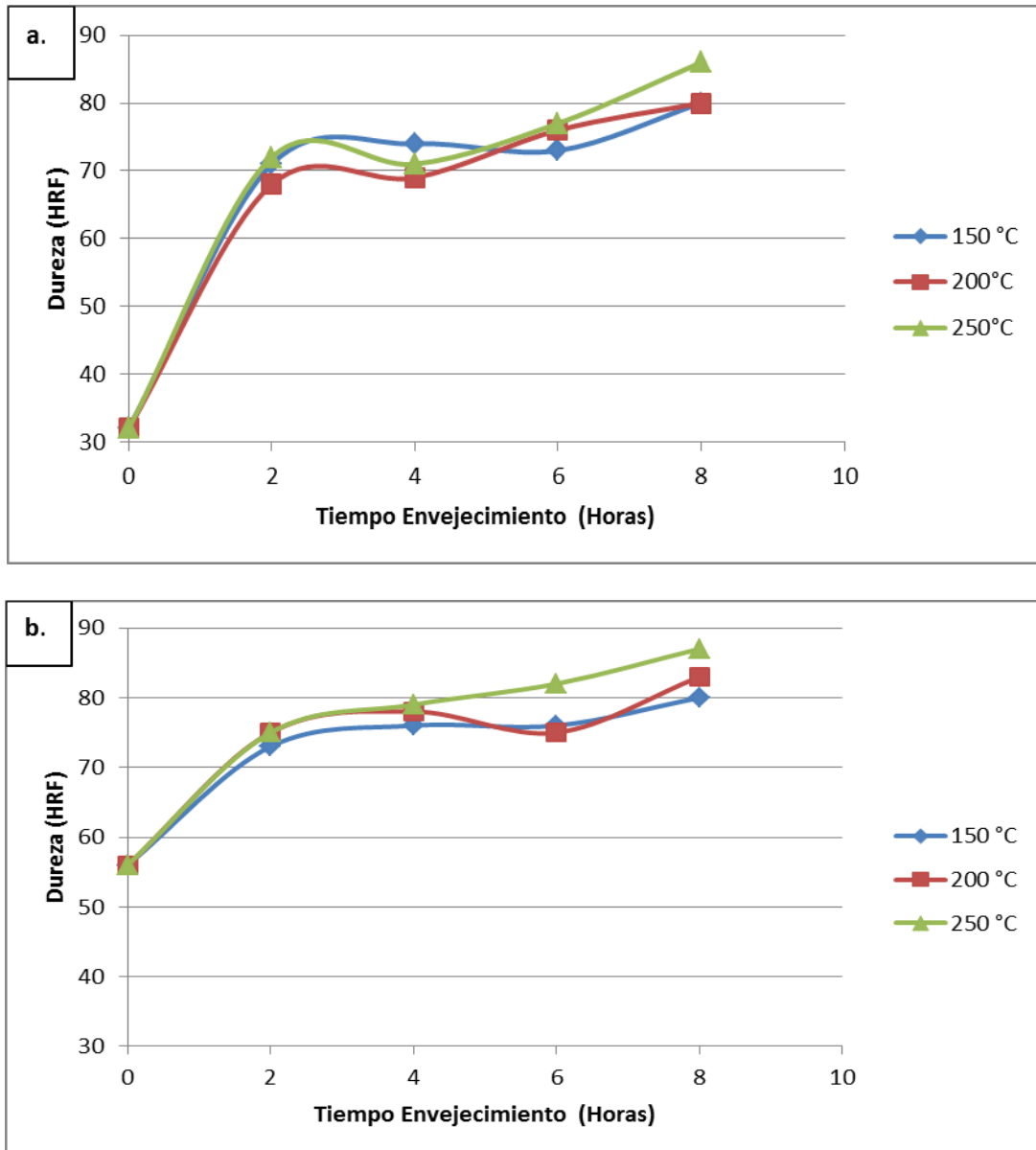
Basados en la literatura consultada previamente, al elevar la temperatura de envejecimiento de las aleaciones que se encontraban en una condición de temple, es decir, que poseían una solución sólida  $\alpha$  de Al-Cu sobresaturada en cobre, se esperaría la nucleación de una segunda fase  $\theta$  en forma de finas partículas que reforzarían la matriz blanda  $\alpha$  y, por tanto, se incrementaría la dureza del material. Éste endurecimiento se puede visualizar en la Figura 4, dónde se tiene que la dureza de ambas aleaciones aumentó considerablemente después de ser sometidas al tratamiento térmico. Por ejemplo, la aleación con un 5%Cu en peso

contaba con una dureza inicial de 56 HRF, la cual se incrementó al ser sometida a envejecimiento artificial durante 8 horas a temperaturas de 150°C, 200°C y 250° dónde aumentó a 80 HRF, 83 HRF y 87 HRF respectivamente.

Para las probetas de la aleación con un 4.5%Cu en peso se pasó de una dureza de 32HRF a un intervalo entre 80HRF y 86 HRF. Entretanto, la aleación con un 5%p pasó de 56HRF a 80HRF y 87HRF. Al aumentar la temperatura de envejecimiento se aumentan también las zonas de nucleación por lo cual se tendrá una mayor cantidad de partículas (probablemente de fase  $\theta$ ) y por ende se aumentó también la dureza. Este mismo comportamiento se dio cuando se incrementó el tiempo de sostenimiento.

El mayor incremento en la dureza de la aleación con un 4.5%Cu en peso se dió bajo una temperatura de envejecimiento de 250°C durante un tiempo de sostenimiento de 8 horas; para la aleación con 5%Cu en peso se dió bajo las mismas condiciones de la aleación con un 4.5%Cu. Al analizar éste incremento se observó que la primera aleación presenta un mayor porcentaje de cambio en ésta propiedad que en la segunda aleación. (Anexo D).

**Figura 4. Curva Dureza-Tiempo de envejecimiento a diferentes temperaturas. a). Aleación con 4.5%Cu en peso. b). Aleación con 5%Cu en peso.**



La formación de precipitados finos en la aleación impiden el movimiento de las dislocaciones durante la deformación, forzando a que estas pasen a través de las partículas (cortándolas o rodeándolas) y por lo tanto incrementaron la dureza de la aleación Al-Cu [16]. A pesar del incremento en los valores de dureza obtenidos al aplicar el tratamiento térmico de envejecimiento artificial, éstos no se

encuentran dentro de los rangos establecidos comúnmente en la literatura, los cuales son de 100HB y 120HB(93,4HRF-99,6HRF) [13]. Lo anterior puede deberse principalmente a dos factores:

- La composición de los materiales objeto de estudio, teniendo en cuenta que poseen altos porcentajes de impurezas como hierro, que desfavorecen la formación de los precipitados de  $CuAl_2$  y promueven el crecimiento de precipitados frágiles como  $Cu_2FeAl_7$  [10].
- A la porosidad inicial del material, la cual afecta desfavorablemente la dureza de la aleación [17].

### 4.3. ENSAYO DE TRACCIÓN

El ensayo de tracción se aplicó para cada aleación, a una probeta sin tratamiento térmico y a las tres con envejecimiento artificial que presentaron la mayor dureza, dónde éstas últimas correspondieron a un tiempo de 8 horas de sostenimiento a 150°C, 200°C y 250°C. En la Tabla 6 se presentan los valores de resistencia a la tracción que corresponde al esfuerzo máximo que soportan las probetas antes de fallar y cuyo cálculo se detalla en el Anexo B.

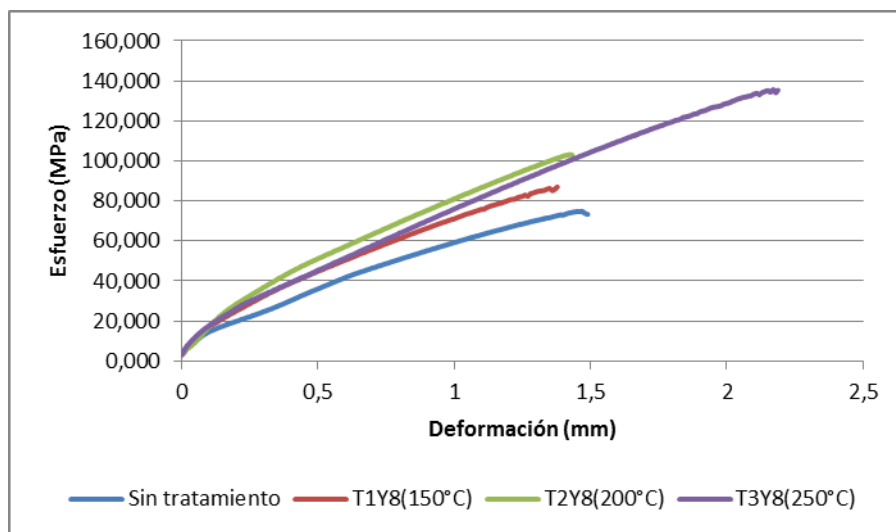
**Tabla 7. Resistencia a la tracción de aleaciones Al-Cu a un tiempo de envejecimiento de 8 horas a diferentes temperaturas.**

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (MPa)		
	ALEACIÓN 1 (4.5%p Cu)	ALEACIÓN 2 (5%p Cu)
<b>Sin tratamiento</b>	74,750	117,031
<b>150 °C</b>	86,250	123,594
<b>200 °C</b>	103,125	124,063
<b>250 °C</b>	135,625	175,208

La aplicación de un tratamiento térmico de envejecimiento artificial durante 8 horas a ambas aleaciones, permitió un incremento en su resistencia a la tracción al aumentar la temperatura del tratamiento tal como se aprecia en las Figura 4 y 5, dónde se obtuvieron los mayores valores a una temperatura de 250°C para ambas aleaciones: 135,625 MPa para la aleación con 4.5%Cu en peso y 175,2%Cu en peso para la aleación con 5%Cu en peso.

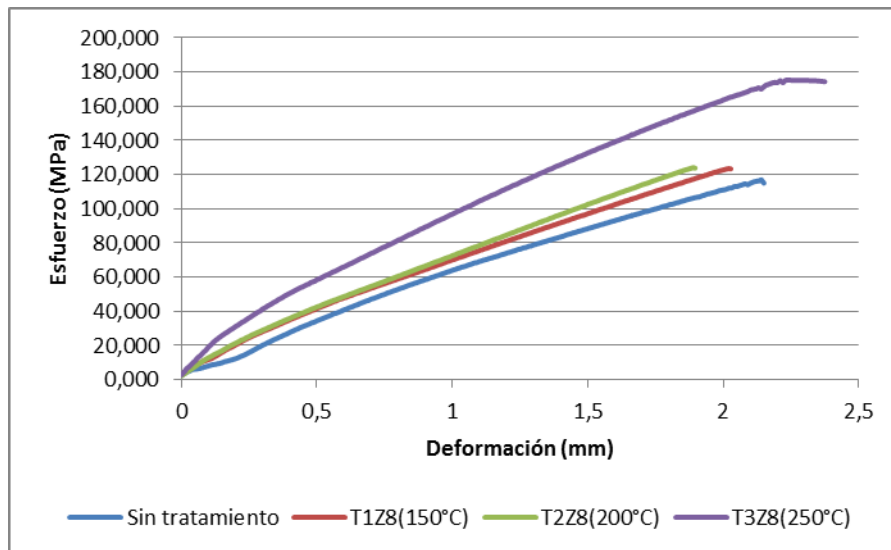
Sin embargo, a pesar de haberse logrado un aumento significativo en las propiedades mecánicas, éstas no alcanzan los valores referidos en la literatura (330MPa-425MPa) [13], probablemente a la microestructura del material, la cual puede contener concentradores de esfuerzos que disminuyen la resistencia a la tracción [18] y que generan un. Lo anterior se busca confirmar a través de un análisis microestructural de microscopía óptica y electrónica.

**Figura 5. Curva esfuerzo-deformación para la aleación con 4.5%Cu en peso sin tratamiento térmico y con envejecimiento artificial durante 8 horas a**



**diferentes temperaturas.**

**Figura 6. Curva esfuerzo-deformación para la aleación con 5pt Cu sin tratamiento térmico y con envejecimiento artificial durante 8 horas a diferentes temperaturas.**

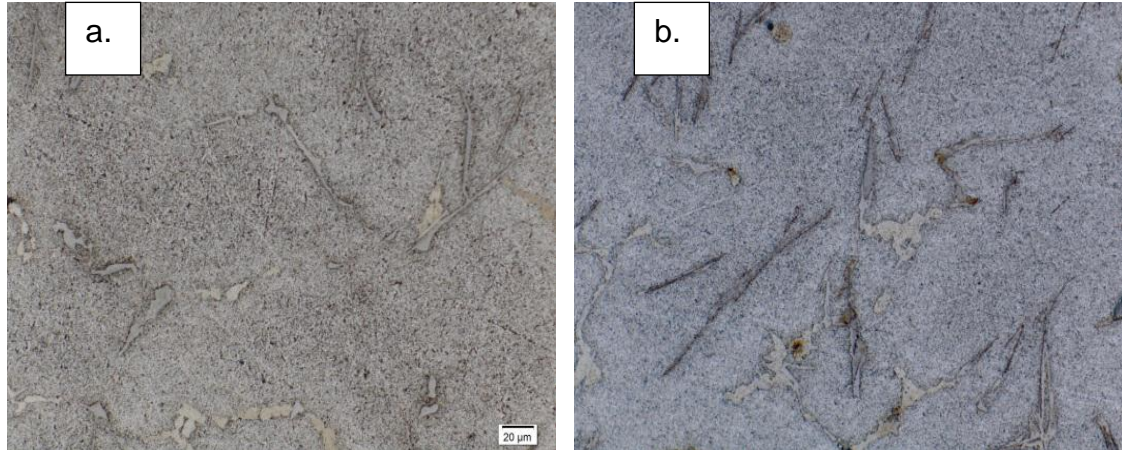


#### **4.4. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL**

A continuación se presentan las micrografías ópticas obtenidas para las aleaciones que mostraron un mejor comportamiento a cada temperatura de envejecimiento artificial.

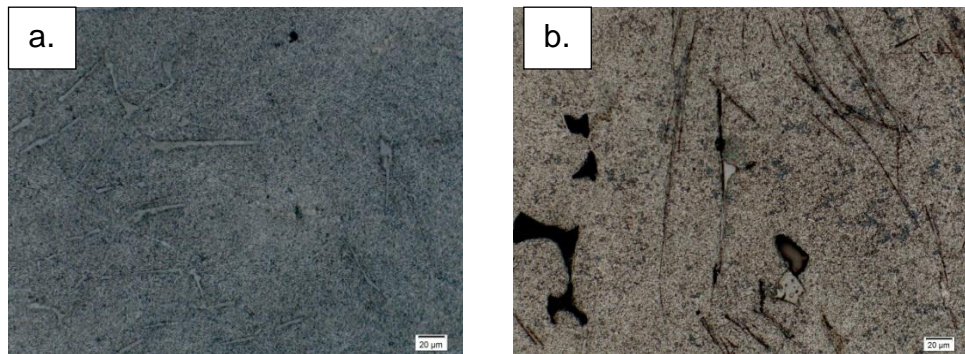
En la Figura 7 se pueden observar las micrografías de la aleación de Aluminio-Cobre con 4,5%Cu y 5%Cu en peso sin tratamiento térmico, dónde se tiene una matriz de fase  $\alpha$  según el diagrama de equilibrio de fases Al-Cu (Figura 1) con unos precipitados en forma de agujas que pueden corresponder al tipo  $Cu_2FeAl_7$  [14], debido a la cantidad de hierro que presentan estas aleaciones [15].

**Figura 7. Micrografías ópticas de las aleaciones sin tratamiento térmico. 50x. a.) Al-4,5%Cu en peso y b.) Al-5%Cu en peso.**

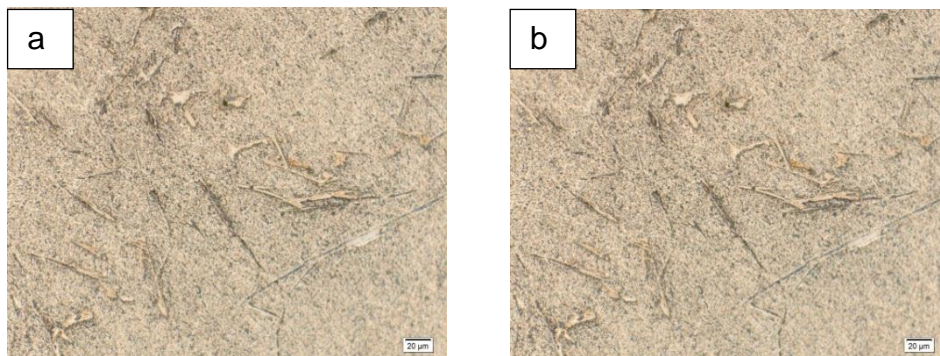


Para las piezas que fueron tratadas térmicamente a las diferentes temperaturas (Figuras 8, 9 y 10) se observa un aumento en los precipitados obtenidos, esto debido al tratamiento térmico aplicado, donde se varió el tiempo y la temperatura de envejecido. Las micrografías que allí se muestran corresponden a las probetas que presentaron un mejor comportamiento en sus propiedades mecánicas tal como se observó en los análisis de dureza y tracción. Para el tiempo de permanencia (8 horas) se puede observar que a mayor temperatura de envejecido mayor es la cantidad de precipitados formados, lo cual se ve reflejado en el aumento de la propiedades mecánicas como se mencionó con anterioridad. Las fases que se presentan siguen siendo las mismas que las mostradas en las aleaciones sin tratamiento térmico, con la diferencia en que los precipitados presentes aumentan con el tiempo y temperatura del tratamiento, además se observa una nueva variedad de precipitados muy pequeños y redondeados [14].

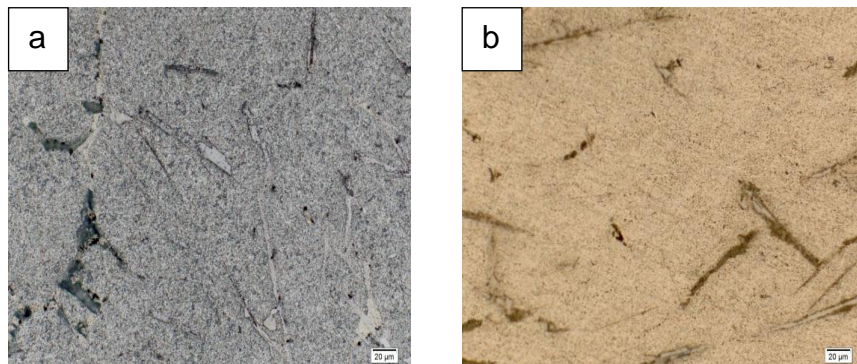
**Figura 8. Micrografías ópticas de las aleaciones tratadas térmicamente a un envejecido a 150°C durante 8 horas. 50x. a**



**Figura 9. Micrografías ópticas de las aleaciones tratadas térmicamente a un envejecido a 200°C durante 8 horas. 50x. a.) Al-4,5%Cu en peso y b.) Al-5%Cu en peso.**



**Figura 10. Micrografías ópticas de las aleaciones tratadas térmicamente a un envejecido a 250°C durante 8 horas. 50x. a.) Al-4,5%Cu en peso y b.) Al-5%Cu en peso.**

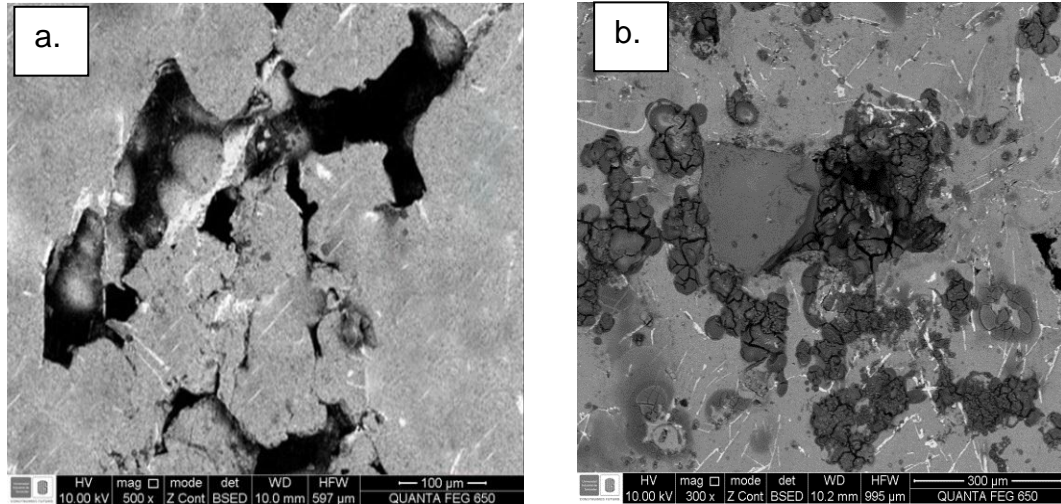


Los nuevos precipitados se pueden observar con mayor claridad en el análisis por microscopía electrónica realizado a estas probetas tal como se observa en las Figuras 11 y 12. Allí se puede notar que éstos nuevos precipitados, en realidad podrían corresponder a productos de corrosión localizados primordialmente en las porosidades del material. Esto debido a que el cobre disminuye resistencia a la corrosión del aluminio.

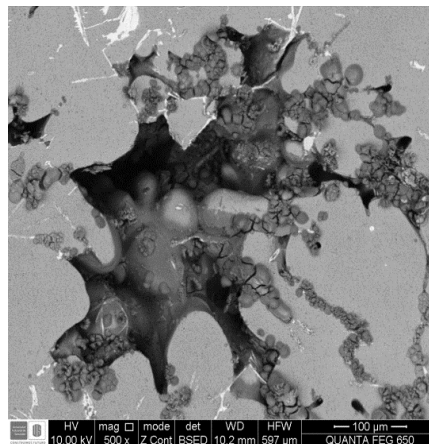
En la Figura 11a. se presenta una matriz de fase  $\alpha$  con algunos precipitados aciculares de color blanco, los cuales se observaron a 500x mediante SEM y de acuerdo a los resultados de EDS se puede decir que son precipitados de  $Cu_2FeAl_7$  debido a su alto contenido de hierro (Anexo C), que actúan como concentrados de esfuerzos y pueden ser responsables del comportamiento frágil del material estudiado. Para las aleaciones tratadas térmicamente con un envejecido de 250°C durante 8 horas, se observa una serie de precipitados aciculares y productos de corrosión en las Figuras 11b y 12. Los cuales, teniendo en cuenta los resultados obtenidos por EDS son ricos en aluminio y cobre.

Los precipitados de tipo  $\theta$  ( $CuAl_2$ ), que normalmente se forman en esta aleación cuando es sometida a este tipo de tratamiento no se lograron observar mediante las técnicas de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, pues al ser tan finos el uso de microscopía electrónica de transmisión (TEM), con la cual no se cuenta durante el desarrollo de la investigación.

**Figura 11. Micrografías electrónicas de la aleación de Al-5%Cu en peso. a). Sin tratamiento térmico y b). Con tratamiento térmico de envejecimiento a 250°C por 8 horas.**



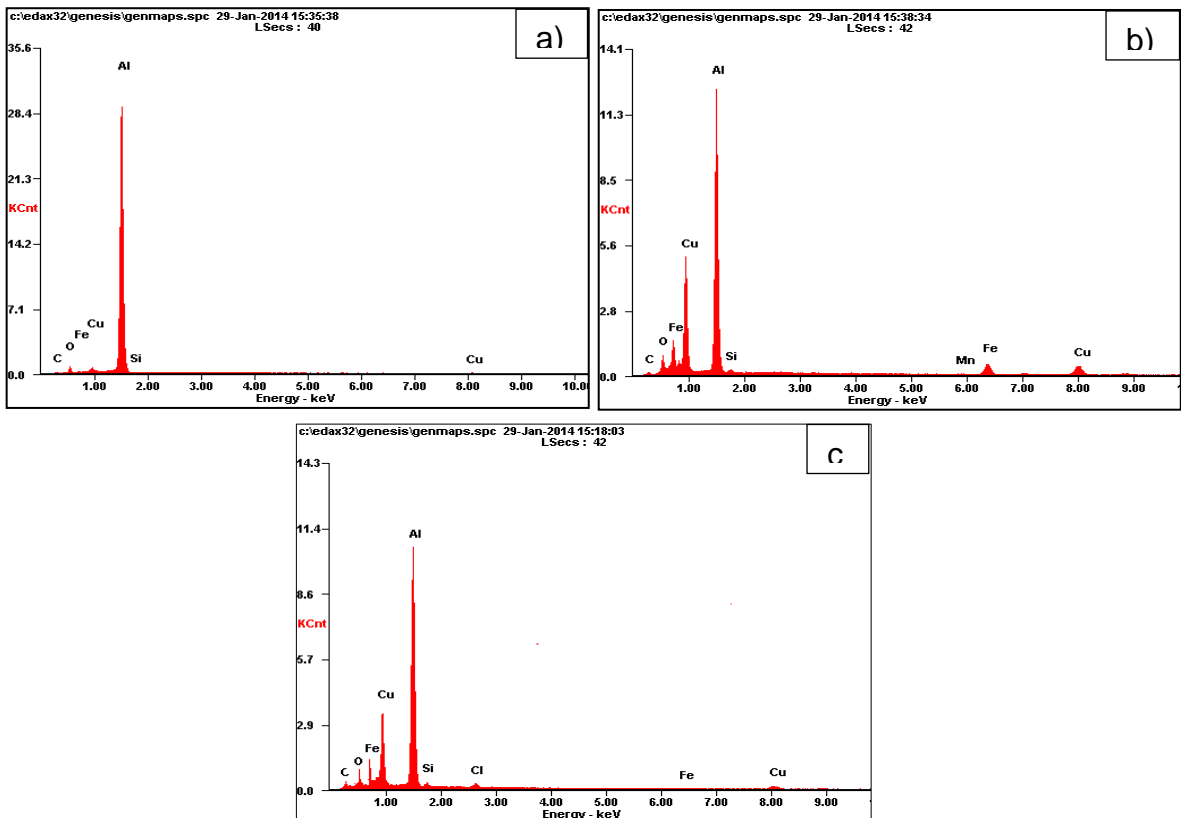
**Figura 12. Micrografía electrónica de la aleación de Al-4.5%Cu en peso, con tratamiento térmico de envejecimiento a 250°C por 8 horas.**



En la Figura 13 se muestran los espectros EDS obtenidos para la aleación Al-4,5%Cu en peso tratadas térmicamente, a una temperatura de solución de 525°C, templada en agua, envejecimiento artificial a 250°C por 8 horas. Se tomaron estos espectros teniendo en cuenta que esta aleación presenta mayor aumento en sus propiedades mecánicas. Los espectros de las aleaciones Al-5%Cu en peso sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico se pueden encontrar en el Anexo C.

En los espectros se pueden observar las composiciones de los diferentes precipitados obtenidos, así como de la matriz del material. En la Figura 13b) correspondiente a los productos de corrosión, se observa que son ricos en cobre, con la presencia de altos contenidos de hierro. En la Figura 13c) se observa que los precipitados aciculares presentes en la Figura 12 son ricos en hierro por lo cual se puede decir que estos precipitados son de tipo  $Cu_2FeAl_7$ .

**Figura 13. Espectros EDS de la aleación Al-4,5%Cu en peso, tratada térmicamente a un envejecido de 250°C durante 8 horas. a). Matriz compuesta principalmente de aluminio, b). Productos de corrosión c). Precipitados de color blanco en forma de agujas.**



## 5. CONCLUSIONES

Se aplicó un tratamiento térmico a dos aleaciones de aluminio-cobre con porcentajes de cobre de 4,5 y 5%p, para temperaturas de envejecido de 150°C, 200°C y 250°C durante 2, 4, 6 y 8 horas. En donde se observaron precipitados aciculares probablemente del tipo  $Cu_2FeAl_7$ . Sin embargo no se puede asegurar la obtención de un endurecimiento por precipitación, dado que el tipo y distribución de los precipitados ( $CuAl_2$ ) que lo confirman no fueron observados.

La primera aleación, la cual contiene un 4,5%p Cu aumentó su dureza en un 169% y la resistencia a la tracción 81%; la segunda con un contenido de cobre de 5%p aumentó 55% en su dureza y 50% en la resistencia a la tracción. Esta mejora de las propiedades mecánicas indica que el tratamiento aplicado fue efectivo para estas composiciones, debido a la formación de precipitados.

Las mejores condiciones, entre las analizadas, para el tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación para la aleación Al-4,5%p teniendo en cuenta tanto el aumento en su dureza como en su resistencia a la tracción son: tratamiento térmico de solución a 525°C por 2 horas, temple agua y envejecido de 250°C durante 8 horas. Para la aleación Al-5%p Cu son: tratamiento térmico de solución a 550°C por 2 horas, temple agua y envejecido de 250°C durante 8 horas.

Las propiedades mecánicas alcanzadas no se acercan a los valores encontrados en la literatura para este tipo de aleaciones con el tratamiento térmico aplicado, lo cual se debe esencialmente a forma acicular de los precipitados obtenidos, que generan concentradores de esfuerzos disminuyendo la resistencia del material y que se formaron por la presencia de altos contenidos de hierro en su composición.

Así mismo la porosidad del material conlleva a que propiedades mecánicas iniciales del material no fueran las más adecuadas.

## 6. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta que el objetivo de este tipo de tratamiento es mejorar las propiedades mecánicas obteniendo precipitados de  $CuAl_2$ , es necesario contar con un material que contenga la menor cantidad de impurezas, especialmente de hierro. Por lo cual se recomienda una mejora en la aleación base de trabajo.

Para la obtención de éste tipo de aleaciones no es recomendable partir de aluminio y cobre puro, sino de aleaciones ya preestablecidas a las cuales se les haya realizado un refinamiento. Esto debido a la poca solubilidad que tiene el cobre en el aluminio.

Además para la fusión de la aleación se recomienda un mayor control de sus condiciones, especialmente durante el llenado de los moldes para evitar un flujo turbulento que introduzca gases y genere porosidades. Así si mismo se recomiendan el uso de otro tipo de desgasificante más eficaz.

## REFERENCIAS

- [1] COTES Álvaro J., TÉLLEZ Gabriel E.. Respuesta al tratamiento térmico de envejecimiento de las aleaciones Al5Mg y Al10Mg modificadas con 2% de Zinc. Proyecto de grado. UIS. 2008.
- [2] VALENCIA, Asdrúbal. Tratamiento Térmico de los aceros.
- [3] UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. Aleaciones Ligeras [en línea]. {11 de septiembre 2013}. Disponible en: (<http://grupos.unican.es/gidai/web/asignaturas/CI/Aluminio.pdf>).
- [4] Aluminio y sus aleaciones [en línea]. Disponible en: ([es.scribd.com/doc/12945248/aluminio-y-sus-aleaciones](http://es.scribd.com/doc/12945248/aluminio-y-sus-aleaciones)). [Citado en agosto de 2013].
- [5] Análisis numérico comparativo de fijadores para el tratamiento de fracturas proximales del fémur/ Ingeniería Mecánica. (Vol. 14. N° 3: 2011). La Habana.
- [6] ASM Handbook, Metals Handbook Volume 4. Heat Treating. EEUU: ASM International EEUU, 1991, pag. 832-839
- [7] Duraluminio [en línea]. Disponible en: ([www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/1/ME32A/1/material\\_docente/previsualizar?id\\_material=231685](http://www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/1/ME32A/1/material_docente/previsualizar?id_material=231685)). [Citado en Julio 17 de 2013].
- [8] COMBITA PUERTO, Jorge Eduardo. DALLOS MARTÍNEZ, Laura Lorena. Fabricación de un duraluminio para su potencial aplicación como soporte guía en cirugía ortopédica. Bucaramanga, 2012. 72 p. Trabajo de grado (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas.
- [9] DIMAS A. Cesar Gerardo. Efecto de la temperatura de solubilización sobre las propiedades mecánicas en una aleación Al-Si tipo A319. 1999. Pág 74. Tesis (Maestría en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales). Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica.

- [10] MAFFIA Ernesto G. Estructura y propiedades de las aleaciones: Aluminio y sus aleaciones. 2013. Pág 17-18.
- [11] MAY A., BELOUHRANI M.A., TAHARBOUCHT S., BOUDRAS A. Influence of heat treatment on the fatigue behavior of two aluminium alloys 2024 and 2024 plated. En : Procedia Engineering, Vol. 2, April 2010, p. 1795-1804.
- [12] ASM Handbook, Metals Handbook Volume 4. Heat Treating. EEUU: ASM International EEUU, 1991, pag. 832-839
- [13] LOPEZ, Fausto. PACHECHO Nelson. Características y utilidades del duraluminio aplicados a la ingeniería. Bogotá.2011. 14 p. Trabajo de grado. Fundación Universitaria Los libertadores.
- [14] ASM International. ASM Metals handbook :Metallography and Microstructures. Vol. 9. 1992
- [15] BIRBILIS N., CAVANAUGH M.K., BUCHHEIT R.G. Electrochemical behavior and localized corrosion associated with Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe particles in aluminum alloy 7075-T651. En: Corrosion Science, Vol. 48, December 2006, p. 4202–4215.
- [16] Endurecimiento. [En línea]. Disponible en: (<http://www.utp.edu.co/~publio17/endurecimiento.htm>). [Citado en 4 de enero de 2014].
- [17] MILLÁN L., AGURTO C. Evaluación de la dureza en materiales compuestos SiC-aleaciones base cobre, obtenidos por infiltración reactiva. En: Simposio materia 2013.
- [18] ASKELAND, Donald R, Ciencia e Ingeniería de los materiales, Tercera Edición en español, International Thomson Editores, 1998, p. 253-254.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALUMINIO Y SUS ALEACIONES [en línea]. Disponible en: ([es.scribd.com/doc/12945248/aluminio-y-sus-aleaciones](https://es.scribd.com/doc/12945248/aluminio-y-sus-aleaciones)). [Citado en agosto de 2013].
- Análisis numérico comparativo de fijadores para el tratamiento de fracturas proximales del fémur/ Ingeniería Mecánica. (Vol. 14. N° 3: 2011). La Habana.
- ASKELAND, Donald R, Ciencia e Ingeniería de los materiales, Tercera Edición en español, International Thomson Editores, 1998, p. 253-254.
- ASM Handbook, Metals Handbook Volume 4. Heat Treating. EEUU: ASM International EEUU, 1991, pag. 832-839
- ASM Handbook, Metals Handbook Volume 4. Heat Treating. EEUU: ASM International EEUU, 1991, pag. 832-839
- ASM International. ASM Metals handbook :Metallography and Microstructures. Vol. 9. 1992
- BIRBILIS N., CAVANAUGH M.K., BUCHHEIT R.G. Electrochemical behavior and localized corrosion associated with Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe particles in aluminum alloy 7075-T651. En: Corrosion Science, Vol. 48, December 2006, p. 4202–4215.
- COMBITA PUERTO, Jorge Eduardo. DALLOS MARTÍNEZ, Laura Lorena. Fabricación de un duraluminio para su potencial aplicación como soporte guía en cirugía ortopédica. Bucaramanga, 2012. 72 p. Trabajo de grado (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.
- COTES Álvaro J., TÉLLEZ Gabriel E.. Respuesta al tratamiento térmico de envejecimiento de las aleaciones Al<sub>5</sub>Mg y Al<sub>10</sub>Mg modificadas con 2% de Zinc. Proyecto de grado. UIS. 2008.

- DIMAS A. Cesar Gerardo. Efecto de la temperatura de solubilización sobre las propiedades mecánicas en una aleación Al-Si tipo A319. 1999. Pág 74. Tesis (Maestría en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales). Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica.
- Duraluminio [en línea]. Disponible en: ([www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/1/ME32A/1/material\\_docente/previsualizar?id\\_material=231685](http://www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/1/ME32A/1/material_docente/previsualizar?id_material=231685)). [Citado en Julio 17 de 2013].
- Endurecimiento. [En línea]. Disponible en: (<http://www.utp.edu.co/~publio17/endurecimiento.htm>). [Citado en 4 de enero de 2014].
- LOPEZ, Fausto. PACHECHO Nelson. Características y utilidades del duraluminio aplicados a la ingeniería. Bogotá. 2011. 14 p. Trabajo de grado. Fundación Universitaria Los libertadores.
- MAFFIA Ernesto G. Estructura y propiedades de las aleaciones: Aluminio y sus aleaciones. 2013. Pág 17-18.
- MAY A., BELOUHRANI M.A., TAHARBOUCHT S., BOUDRAS A. Influence of heat treatment on the fatigue behavior of two aluminium alloys 2024 and 2024 plated. En : Procedia Engineering, Vol. 2, April 2010, p. 1795-1804.
- MILLÁN L., AGURTO C. Evaluación de la dureza en materiales compuestos SiC-aleaciones base cobre, obtenidos por infiltración reactiva. En: Simposio materia 2013.
- UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. Aleaciones Ligeras [en línea]. {11 de septiembre 2013}. Disponible en: (<http://grupos.unican.es/gidai/web/asignaturas/CI/Aluminio.pdf>).
- VALENCIA, Asdrúbal. Tratamiento Térmico de los aceros.

## ANEXO

### Anexo A. Fundición

#### OBTENCIÓN DE LAS ALEACIONES

Para el proceso de fundición se utilizaron los materiales mostrados a continuación:

- ♣ Aluminio puro
- ♣ Cobre puro
- ♣ Fundente KCl – NaCl
- ♣ Pastillas de Hexacloroetano
- ♣ Gas de nitrógeno
- ♣ Arena sílice con bentónica cálcica nacional
- ♣ Unto (polvo de grafito, polvo de caolinita, silicato de sodio y agua)
- ♣ Balanza electrónica “OHAUS – TRAVELER”
- ♣ Cinta sin fin bimetálica para corte “SOLO-SIERRAS LTDA”
- ♣ Máquina de corte abrasivo “BUEHLER LTDA”
- ♣ Laminadora “TATUM” de doble cabezal.
- ♣ Estufa “KH HUPPERT CO”
- ♣ Crisol de grafito N.20
- ♣ Horno de crisol fijo a gas natural, capacidad 50 Kg
- ♣ Termocupla de Inmersión
- ♣ Cámara fotográfica
- ♣ Modelo de lingotera de madera
- ♣ Tenazas de extracción, escoriador, porta crisol y pinzas
- ♣ Lanza para desgasificación
- ♣ EPP,s (casco, visera, peto, pechera, botas, guantes, protectores auditivos).

Las condiciones bajo las cuales se realizó el proceso de fundición usando como base 5 kg de capacidad del crisol, se muestran en la siguiente Tabla:

	<b>Aluminio (Kg)</b>	<b>Cobre (Kg)</b>	<b>Temperatura de fusión (°C)</b>	<b>Fundente. (Kg).</b>	<b>Desgasificación</b>
<b>ALEACIÓN 1</b>	4.8	0.2	778	0.5	Se llevó a cabo usando simultáneamente gas de nitrógeno y pastillas de hexacloroetano.
<b>ALEACIÓN 2</b>	4.75	0.25	768	0.5	

## Anexo B. Resultados Ensayo De Tracción

En las siguientes tablas se muestran algunos de los datos de carga y distancia entre ejes, arrojados por el equipo TIMIUS OLSEN durante el ensayo de tracción. No se anexan todos los datos teniendo en cuenta el gran número de éstos, pero en las gráficas si se tuvieron en cuenta todos. Adicionalmente se indican los valores de esfuerzo que se calcularon teniendo en cuenta el área transversal de la probeta y la carga aplicada, usando la siguiente ecuación:

$$\text{Resistencia a la tracción (Mpa)} = \frac{\text{Carga Máxima aplicada (N)}}{\text{Área transversal(mm}^2\text{)}} = \frac{\text{Carga aplicada (N)}}{\text{Ancho(12mm)*Espesor(4mm)}}$$

Results for:	Duraluminio 1		Results for:	Duraluminio 1	
Curves for Specimen No:	1		Curves for Specimen No:	2	
Curve No:	1		Curve No:	1	
Thick, 4mm - Width, 12mm	Sin tratamiento térmico		Thick, 4mm - Width, 12mm	150°C	
Extension mm	Force N	Esfuerzo (Mpa)	Extension mm	Force N	Esfuerzo (Mpa)
1.412	3528	73.500	1.332	4095	85.313
1.414	3532	73.583	1.3335	4100	85.417
1.416	3540	73.750	1.335	4105	85.521
1.418	3544	73.833	1.3365	4110	85.625
1.42	3548	73.917	1.338	4115	85.729

Results for:	Duraluminio 1		Results for:	Duraluminio 1	
<b>1.422</b>	3552	74.000	1.3395	4120	85.833
<b>1.424</b>	3552	74.000	1.341	4125	85.938
<b>1.426</b>	3556	74.083	1.3425	4125	85.938
<b>1.428</b>	3556	74.083	1.344	4130	86.042
<b>1.43</b>	3560	74.167	1.3455	4130	86.042
<b>1.432</b>	3564	74.250	1.347	4135	86.146
<b>1.434</b>	3564	74.250	1.3485	4135	86.146
<b>1.436</b>	3568	74.333	1.35	4140	86.250
<b>1.438</b>	3568	74.333	1.3515	4130	86.042
<b>1.44</b>	3572	74.417	1.353	4125	85.938
<b>1.442</b>	3576	74.500	1.3545	4115	85.729
<b>1.444</b>	3576	74.500	1.356	4110	85.625
<b>1.446</b>	3580	74.583	1.3575	4100	85.417
<b>1.448</b>	3580	74.583	1.359	4095	85.313
<b>1.45</b>	3584	74.667	1.3605	4085	85.104
<b>1.452</b>	3584	74.667	1.362	4090	85.208
<b>1.454</b>	3584	74.667	1.3635	4095	85.313
<b>1.456</b>	3584	74.667	1.365	4100	85.417
<b>1.458</b>	3584	74.667	1.3665	4110	85.625
<b>1.46</b>	3584	74.667	1.368	4115	85.729
<b>1.462</b>	3584	74.667	1.3695	4120	85.833
<b>1.464</b>	3584	74.667	1.371	4130	86.042
<b>1.466</b>	3588	74.750	1.3725	4140	86.250
<b>1.468</b>	3588	74.750	1.332	4095	85.313
<b>1.47</b>	3588	74.750	1.3335	4100	85.417
<b>1.472</b>	3580	74.583	1.335	4105	85.521
<b>1.474</b>	3568	74.333	1.3365	4110	85.625

Results for:	Duraluminio 1		Results for:	Duraluminio 1	
1.476	3560	74.167	1.338	4115	85.729
1.478	3548	73.917	1.3395	4120	85.833
1.48	3540	73.750	1.371	4130	86.042

Results for:	Duraluminio 1		Results for:	Duraluminio 1	
<b>Curves for Specimen No:</b>	<b>3</b>		<b>Curves for Specimen No:</b>	<b>4</b>	
<b>Curve No:</b>	<b>1</b>		<b>Curve No:</b>	<b>1</b>	
<b>Thick, 4mm - Width, 12mm</b>	<b>200°C</b>		<b>Thick, 4mm - Width, 12mm</b>	<b>250°C</b>	
<b>Extension mm</b>	<b>Force N</b>	<b>Esfuerzo (Mpa)</b>	<b>Extension mm</b>	<b>Force N</b>	<b>Esfuerzo (Mpa)</b>
1.377	4865	101.354	2.095	6390	133.125
1.3785	4865	101.354	2.0975	6397.5	133.281
1.38	4870	101.458	2.1	6405	133.438
1.3815	4875	101.563	2.1025	6405	133.438
1.383	4875	101.563	2.105	6412.5	133.594
1.3845	4880	101.667	2.1075	6420	133.750
1.386	4880	101.667	2.11	6420	133.750
1.3875	4885	101.771	2.1125	6412.5	133.594
1.389	4885	101.771	2.115	6405	133.438
1.3905	4890	101.875	2.1175	6397.5	133.281
1.392	4895	101.979	2.12	6390	133.125

Results for:	Duraluminio 1		Results for:	Duraluminio 1	
<b>1.3935</b>	4900	102.083	2.1225	6405	133.438
<b>1.395</b>	4900	102.083	2.125	6420	133.750
<b>1.3965</b>	4905	102.188	2.1275	6427.5	133.906
<b>1.398</b>	4910	102.292	2.13	6442.5	134.219
<b>1.3995</b>	4915	102.396	2.1325	6450	134.375
<b>1.401</b>	4915	102.396	2.135	6450	134.375
<b>1.4025</b>	4920	102.500	2.1375	6457.5	134.531
<b>1.404</b>	4920	102.500	2.14	6465	134.688
<b>1.4055</b>	4925	102.604	2.1425	6472.5	134.844
<b>1.407</b>	4925	102.604	2.145	6480	135.000
<b>1.4085</b>	4930	102.708	2.1475	6480	135.000
<b>1.41</b>	4930	102.708	2.15	6487.5	135.156
<b>1.4115</b>	4930	102.708	2.1525	6480	135.000
<b>1.413</b>	4935	102.813	2.155	6465	134.688
<b>1.4145</b>	4935	102.813	2.1575	6457.5	134.531
<b>1.416</b>	4940	102.917	2.16	6450	134.375
<b>1.4175</b>	4940	102.917	2.1625	6465	134.688
<b>1.419</b>	4945	103.021	2.165	6480	135.000
<b>1.4205</b>	4945	103.021	2.1675	6495	135.313
<b>1.422</b>	4945	103.021	2.17	6510	135.625
<b>1.4235</b>	4945	103.021	2.1725	6495	135.313
<b>1.425</b>	4950	103.125	2.175	6472.5	134.844
<b>1.4265</b>	4950	103.125	2.1775	6450	134.375
<b>1.428</b>	4950	103.125	2.18	6435	134.063

Results for:	Duraluminio 2		Results for:	Duraluminio 2	
Curves for Specimen No:	5		Curves for Specimen No:	6	
Curve No:	1		Curve No:	1	
Thick, 4mm - Width, 12mm	Sin tratamiento		Thick, 4mm - Width, 12mm	150°C	
Extension mm	Force N	Esfuerzo (Mpa)	Extension mm	Force N	Esfuerzo (Mpa)
2.06	5452.5	113.594	1.9425	5760	120.000
2.0625	5460	113.750	1.945	5767.5	120.156
2.065	5460	113.750	1.9475	5775	120.313
2.0675	5467.5	113.906	1.95	5782.5	120.469
2.07	5475	114.063	1.9525	5790	120.625
2.0725	5482.5	114.219	1.955	5790	120.625
2.075	5490	114.375	1.9575	5797.5	120.781
2.0775	5497.5	114.531	1.96	5805	120.938
2.08	5505	114.688	1.9625	5812.5	121.094
2.0825	5497.5	114.531	1.965	5820	121.250
2.085	5490	114.375	1.9675	5820	121.250
2.0875	5482.5	114.219	1.97	5827.5	121.406
2.09	5475	114.063	1.9725	5835	121.563
2.0925	5490	114.375	1.975	5835	121.563
2.095	5497.5	114.531	1.9775	5842.5	121.719

Results for:	Duraluminio 2		Results for:	Duraluminio 2	
2.0975	5505	114.688	1.98	5850	121.875
2.1	5520	115.000	1.9825	5857.5	122.031
2.1025	5527.5	115.156	1.985	5865	122.188
2.105	5535	115.313	1.9875	5865	122.188
2.1075	5542.5	115.469	1.99	5872.5	122.344
2.11	5550	115.625	1.9925	5880	122.500
2.1125	5557.5	115.781	1.995	5880	122.500
2.115	5565	115.938	1.9975	5887.5	122.656
2.1175	5565	115.938	2	5895	122.813
2.12	5572.5	116.094	2.0025	5895	122.813
2.1225	5572.5	116.094	2.005	5902.5	122.969
2.125	5580	116.250	2.0075	5910	123.125
2.1275	5580	116.250	2.01	5910	123.125
2.13	5580	116.250	2.0125	5917.5	123.281
2.1325	5587.5	116.406	2.015	5925	123.438
2.135	5595	116.563	2.0175	5925	123.438
2.1375	5610	116.875	2.02	5932.5	123.594
2.14	5617.5	117.031	2.0225	5928	123.500
2.1425	5595	116.563	2.025	5924	123.417
2.145	5565	115.938	2.0275	5920.5	123.344

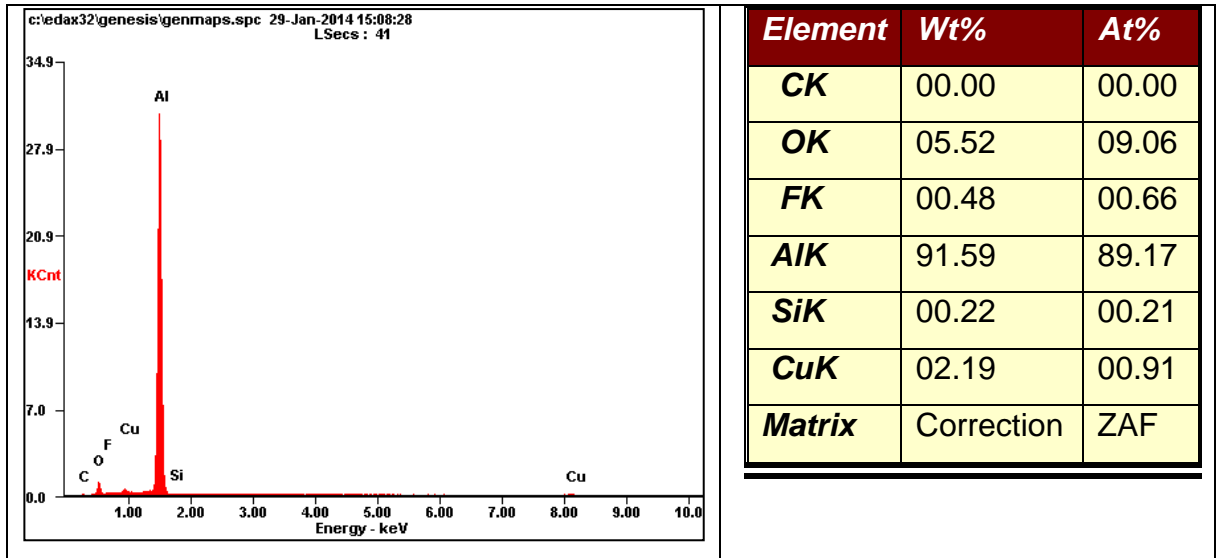
Results for:	Duraluminio 2		Results for:	Duraluminio 2	
Curves for Specimen No:	7		Curves for Specimen No:	8	
Curve No:	1		Curve No:	1	

Results for:	Duraluminio 2		Results for:	Duraluminio 2	
Thick, 4mm - Width, 12mm	200°C		Thick, 4mm - Width, 12mm	250°C	
Extension mm	Force N	Esfuerzo (Mpa)	Extension mm	Force N	Esfuerzo (Mpa)
1.826	5805	120.938	2.1525	8240	171.667
1.828	5805	120.938	2.155	8260	172.083
1.83	5812.5	121.094	2.1575	8270	172.292
1.832	5820	121.250	2.16	8280	172.500
1.834	5827.5	121.406	2.1625	8280	172.500
1.836	5827.5	121.406	2.165	8290	172.708
1.838	5835	121.563	2.1675	8300	172.917
1.84	5842.5	121.719	2.17	8300	172.917
1.842	5850	121.875	2.1725	8310	173.125
1.844	5850	121.875	2.175	8320	173.333
1.846	5857.5	122.031	2.1775	8320	173.333
1.848	5857.5	122.031	2.18	8330	173.542
1.85	5865	122.188	2.1825	8340	173.750
1.852	5872.5	122.344	2.185	8340	173.750
1.854	5880	122.500	2.1875	8340	173.750
1.856	5880	122.500	2.19	8350	173.958
1.858	5887.5	122.656	2.1925	8350	173.958
1.86	5895	122.813	2.195	8340	173.750
1.862	5895	122.813	2.1975	8340	173.750
1.864	5902.5	122.969	2.2	8340	173.750
1.866	5902.5	122.969	2.2025	8360	174.167

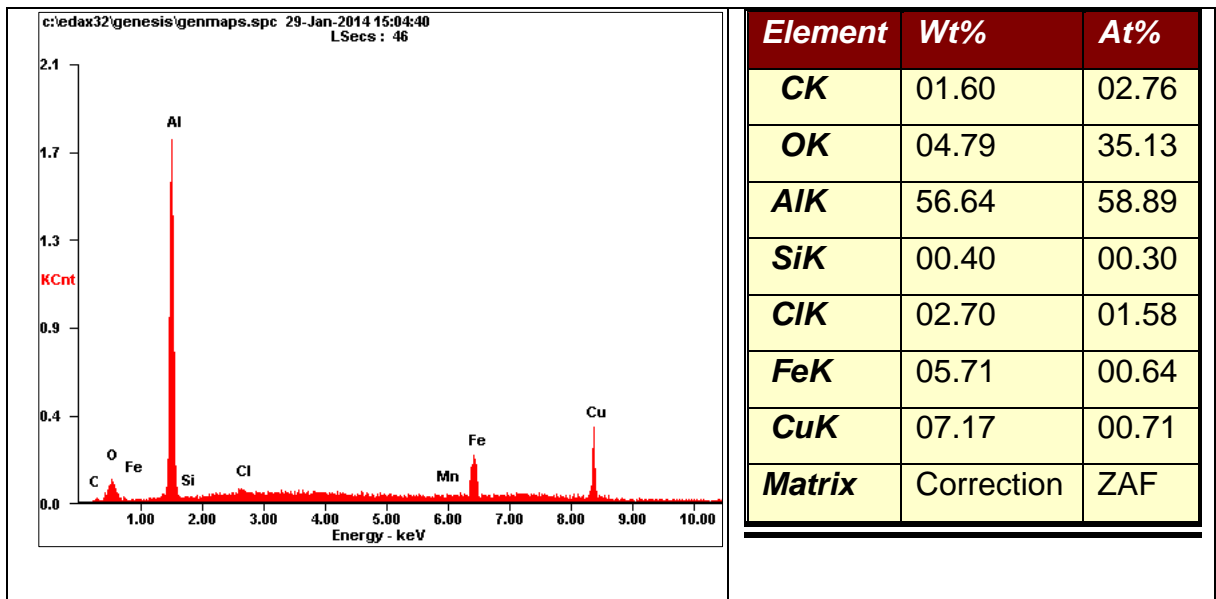
Results for:	Duraluminio 2		Results for:	Duraluminio 2	
<b>1.868</b>	5910	123.125	2.205	8370	174.375
<b>1.87</b>	5910	123.125	2.2075	8380	174.583
<b>1.872</b>	5917.5	123.281	2.21	8400	175.000
<b>1.874</b>	5925	123.438	2.2125	8380	174.583
<b>1.876</b>	5925	123.438	2.215	8370	174.375
<b>1.878</b>	5932.5	123.594	2.2175	8360	174.167
<b>1.88</b>	5940	123.750	2.22	8340	173.750
<b>1.882</b>	5940	123.750	2.2225	8360	174.167
<b>1.884</b>	5947.5	123.906	2.225	8380	174.583
<b>1.886</b>	5947.5	123.906	2.2275	8390	174.792
<b>1.888</b>	5955	124.063	2.23	8410	<b>175.208</b>
<b>1.89</b>	5955	124.063	2.325	8400	175.000
<b>1.892</b>	5955	<b>124.063</b>	2.35	8390	174.792
<b>1.894</b>	5945	123.854	2.375	8370	174.375

## Anexo C. Resultado EDS de microscopía electrónica de barrido (SEM)

- **Al-5%Cu sin tratamiento térmico**

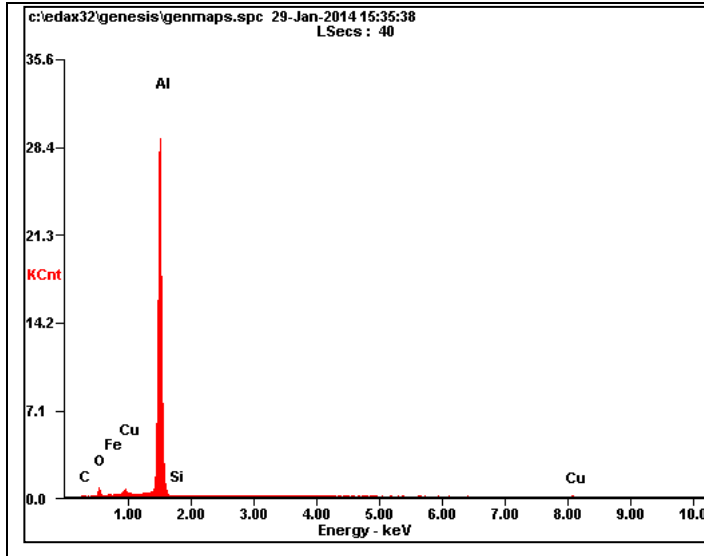


Matriz compuesta principalmente de Al



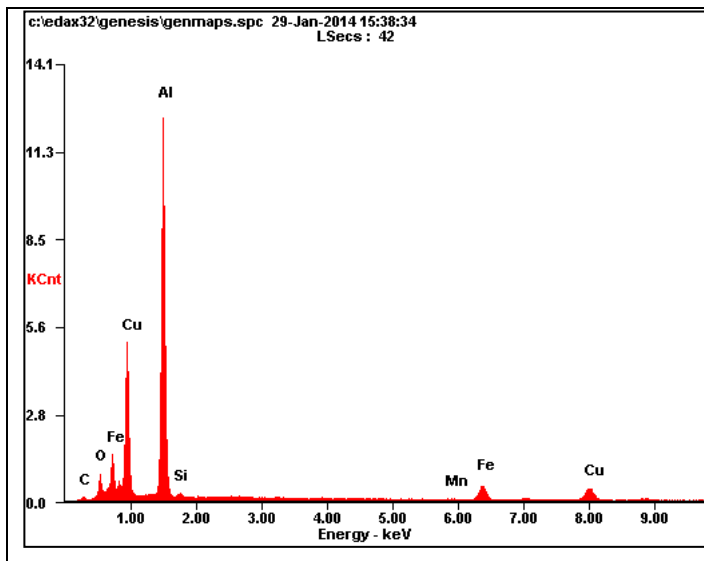
Precipitado de color blanco en formas de agujas

- Al-4,5%Cu con tratamiento térmico con un envejecido a 25°C durante 8 horas.



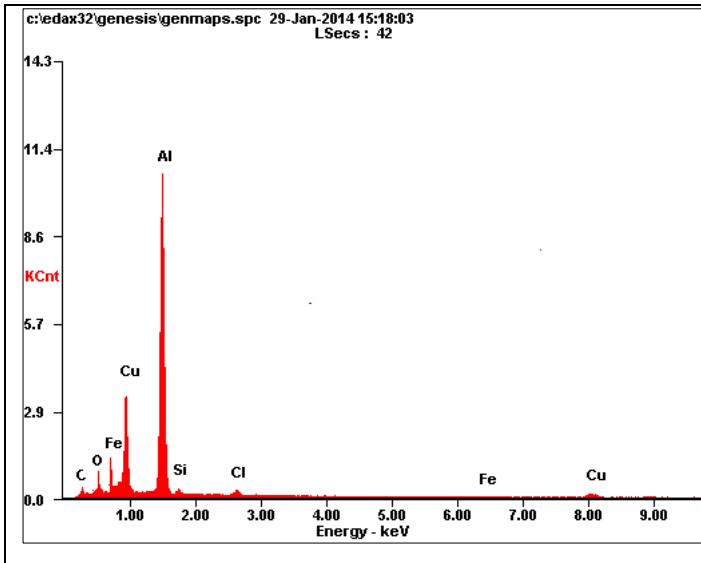
<b>Element</b>	<b>Wt%</b>	<b>At%</b>
<b>CK</b>	01.16	02.55
<b>OK</b>	03.76	06.22
<b>FeL</b>	01.62	00.77
<b>AlK</b>	91.11	89.39
<b>SiK</b>	00.17	00.16
<b>CuK</b>	02.18	00.91
<b>Matrix</b>	Correction	ZAF

Matriz compuesta principalmente de Al



<b>Element</b>	<b>Wt%</b>	<b>At%</b>
<b>CK</b>	00.65	01.86
<b>OK</b>	03.43	07.31
<b>AlK</b>	52.35	66.07
<b>SiK</b>	00.66	00.80
<b>MnK</b>	00.46	00.28
<b>FeK</b>	12.70	07.75
<b>CuK</b>	29.74	15.94
<b>Matrix</b>	Correction	ZAF

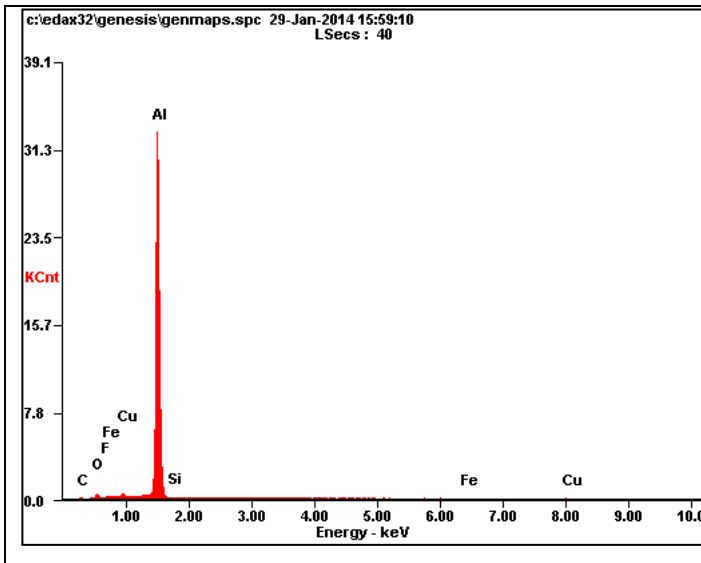
Productos de corrosión



Element	Wt%	At%
<b>CK</b>	02.76	01.19
<b>OK</b>	09.60	0.75
<b>AlK</b>	46.60	65.56
<b>ClK</b>	00.44	00.28
<b>FeK</b>	18.86	07.61
<b>CuK</b>	21.74	17.62
<b>Matrix</b>	Correction	ZAF

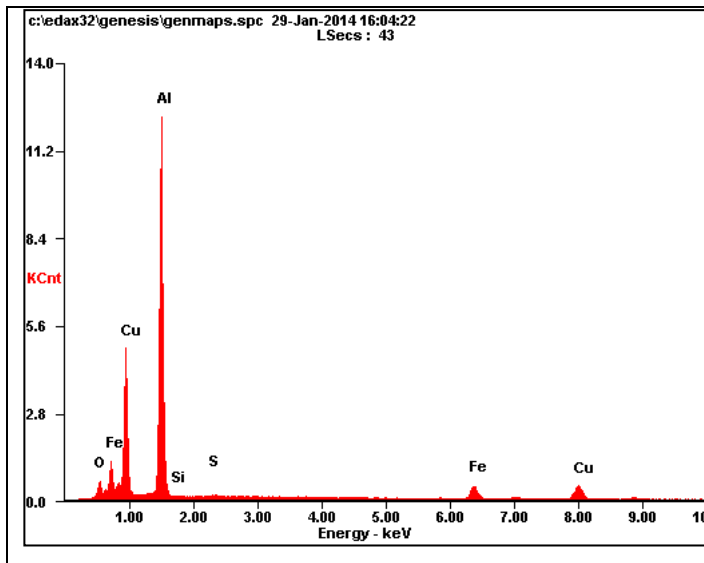
Precipitado de color blanco en forma de agujas

- **Al-5%Cu con tratamiento térmico con un envejecido a 250°C durante 8 horas**



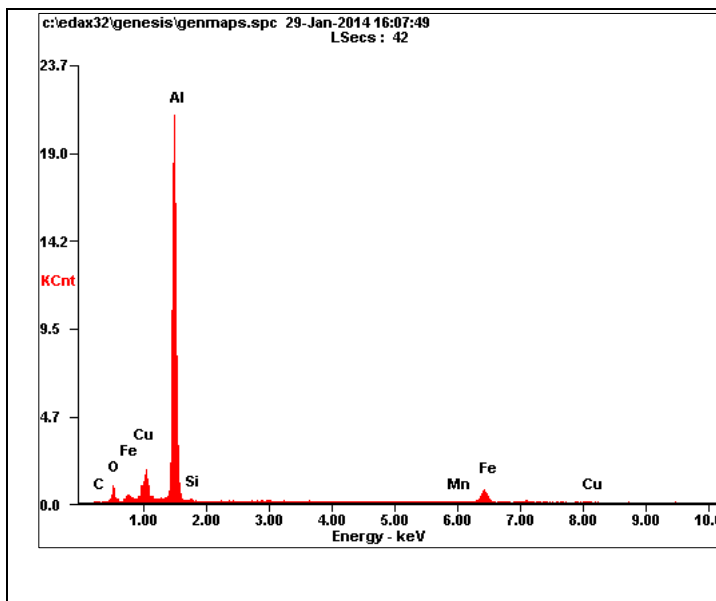
Element	Wt%	At%
<b>CK</b>	00.00	00.00
<b>OK</b>	02.49	04.17
<b>FK</b>	00.39	00.54
<b>AlK</b>	94.96	94.24
<b>SiK</b>	00.21	00.20
<b>FeK</b>	00.35	00.17
<b>CuK</b>	01.60	00.68
<b>Matrix</b>	Correction	ZAF

Matriz compuesta principalmente de Al



<b>Element</b>	<b>Wt%</b>	<b>At%</b>
<b>OK</b>	02.61	05.67
<b>AlK</b>	53.45	68.99
<b>SiK</b>	00.17	00.21
<b>SK</b>	00.40	00.43
<b>FeK</b>	12.15	07.58
<b>CuK</b>	31.23	17.12
<b>Matrix</b>	Correction	ZAF

Precipitados de color blanco en forma de agujas



<b>Element</b>	<b>Wt%</b>	<b>At%</b>
<b>CK</b>	00.00	00.00
<b>OK</b>	04.29	07.96
<b>AlK</b>	72.10	79.29
<b>SiK</b>	00.62	00.66
<b>MnK</b>	00.67	00.36
<b>FeK</b>	02.42	10.85
<b>CuK</b>	19.90	00.89
<b>Matrix</b>	Correction	ZAF

Precipitados de color blanco en forma de agujas

Productos de  
corrosión

**Anexo D. Variación Porcentual de Propiedades Mecánicas.**

**Aumento de propiedades mecánicas de la aleación de Al-4,5%p Cu tratada térmicamente**

<b>150°C</b>			
<b>Identificación</b>	<b>Tiempo de permanencia (h)</b>	<b>% Aumento De Dureza</b>	<b>% Aumento Resistencia a la Tracción</b>
<b>T1Y2</b>	2	121,88	No se realizó
<b>T1Y4</b>	4	131,25	
<b>T1Y6</b>	6	128,13	
<b>T1Y8</b>	8	150,00	15,38
<b>200°C</b>			
<b>T2Y2</b>	2	112,50	No se realizó
<b>T2Y4</b>	4	115,63	
<b>T2Y6</b>	6	137,50	
<b>T2Y8</b>	8	150,00	37,96
<b>250°C</b>			
<b>T3Y2</b>	2	125,00	No se realizó
<b>T3Y4</b>	4	121,88	
<b>T3Y6</b>	6	140,63	
<b>T3Y8</b>	8	168,75	81,44

**Aumento de propiedades mecánicas de la aleación de Al-5%p Cu tratada térmicamente**

<b>150°C</b>			
<b>Identificación</b>	<b>Tiempo de permanencia (h)</b>	<b>% Aumento de dureza</b>	<b>% aumento resistencia a la tracción</b>
<b>T1Z2</b>	2	30,36	No se realizó
<b>T1Z4</b>	4	35,71	
<b>T1Z6</b>	6	35,71	
<b>T1Z8</b>	8	42,86	5,61
<b>200°C</b>			
<b>T2Z2</b>	2	33,93	No se realizó
<b>T2Z4</b>	4	39,29	
<b>T2Z6</b>	6	33,93	
<b>T2Z8</b>	8	48,21	6,01
<b>250°C</b>			
<b>T3Z2</b>	2	33,93	No se realizó
<b>T3Z4</b>	4	41,07	
<b>T3Z6</b>	6	46,43	
<b>T3Z8</b>	8	55,36	49,71