

**ESTUDIO DE LA MICROESTRUCTURA Y RESISTENCIA A LA CORROSIÓN
DE LA ALEACIÓN CON MEMORIA DE FORMA Cu-Al-Ni-Y ELABORADA POR
FUNDICIÓN**

**SERGIO ESTEBAN ARIAS NAVARRO
MARIO ALEJANDRO GONZÁLEZ MUÑOZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2019

**ESTUDIO DE LA MICROESTRUCTURA Y RESISTENCIA A LA CORROSIÓN
DE LA ALEACIÓN CON MEMORIA DE FORMA Cu-Al-Ni-Y ELABORADA POR
FUNDICIÓN**

**SERGIO ESTEBAN ARIAS NAVARRO
MARIO ALEJANDRO GONZÁLEZ MUÑOZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Metalúrgico**

**DIRECTOR
ANDRÉS GIOVANNI GONZÁLEZ HERNÁNDEZ
Ph.D. EN INGENIERIA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2019

AGRADECIMIENTOS

A Dios en primer lugar porque toda la gloria y la honra sea para El.

A mis padres, Alba Muñoz y Mario González porque además de ser un apoyo incondicional, son la motivación para la consecución de todos mis objetivos.

A Alejandra Peña por su compañía y colaboración en todos los momentos de dificultad.

A mis familiares que de diferentes maneras aportaron en mi crecimiento como persona.

A los profesores Andrés González, Mauricio Rincón y Alfredo Gualdrón por la orientación y compañía a lo largo del desarrollo de este trabajo de grado.

A los técnicos Sergio González, Juan Domingo y Ambrosio Carrillo por su amabilidad y colaboración durante toda la carrera.

A mis compañeros, Frank Hernández, Sergio Arias, Frank Ortiz, entre otros. Por hacer más agradable todo el proceso en mi formación como profesional.

Mario Alejandro González Muñoz.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Alba Navarro y Raúl Arias por toda una vida de apoyo, esfuerzo y cariño incondicional.

A mi hermano Sebastián Arias por ser ese ejemplo y guía que me ayuda a crecer cada día como persona.

Al profesor Andrés González por su confianza, tiempo y dedicación durante el desarrollo del proyecto de grado.

A los profesores, Mauricio Rincón y Alfredo Gualdrón por la orientación y compañía en el transcurso de este trabajo de grado.

A los técnicos Sergio González, Juan Domingo y Ambrosio Carrillo por su amabilidad y colaboración durante toda la carrera.

A Mario González y Frank Hernández por su compañerismo y amistad en el transcurso de mi vida universitaria.

Sergio Esteban Arias Navarro

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 16 |
| 1. OBJETIVOS..... | 18 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL | 18 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 18 |
| 2. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE ANTECEDENTES..... | 19 |
| 2.1 ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA | 19 |
| 2.2 TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA | 19 |
| 2.3 MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO | 20 |
| 2.4 TIPOS DE ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA..... | 21 |
| 2.5 MÉTODOS DE FABRICACIÓN | 22 |
| 3. METODOLOGÍA | 23 |
| 3.1 OBTENCIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS..... | 23 |
| 3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL DE LAS ALEACIONES PRINCIPALES | 23 |
| 3.3 FABRICACIÓN DE LAS ALEACIONES..... | 24 |
| 3.4 APLICACIÓN DE FORJA Y TRATAMIENTO TÉRMICO | 24 |
| 3.5 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MICROESTRUCTURAL..... | 24 |
| 3.6 ENSAYO DE DUREZA | 25 |
| 3.7 RESISTENCIA A LA CORROSIÓN | 26 |
| 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS | 27 |
| 4.1 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LA ALEACIÓN CU-13%AL-4%NI | 27 |
| 4.2 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LA ALEACIÓN CU-13%AL-4%NI-1%Y | 28 |
| 4.3 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LA ALEACIÓN CU-13%AL-4%NI-3%Y | 29 |

| | |
|---|----|
| 4.4 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LA ALEACIÓN CU-13%AL-4%NI-5%Y | 30 |
| 4.5 ANÁLISIS QUÍMICO ELEMENTAL DE LAS ALEACIONES | 31 |
| 4.5.1 ANÁLISIS QUÍMICO ELEMENTAL DE LA ALEACIÓN CU-13%AL-4%NI.... | 31 |
| 4.5.2 ANÁLISIS QUÍMICO ELEMENTAL DE LA ALEACIÓN CU-13%AL-4%NI-1%Y. | 32 |
| 4.5.3 ANÁLISIS QUÍMICO ELEMENTAL DE LA ALEACIÓN CU-13%AL-4%NI-3%Y. | 32 |
| 4.5.4 ANÁLISIS QUÍMICO ELEMENTAL DE LA ALEACIÓN CU-13%AL-4%NI-5%Y. | 33 |
| 4.6 ANÁLISIS DE DUREZA | 35 |
| 4.7 ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA CORROSIÓN POR IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA..... | 35 |
| 5. CONCLUSIONES | 39 |
| BIBLIOGRAFÍA | 40 |
| ANEXOS | 42 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. (a) Red completamente austenítica. (b) y (c) transformación de la red de austenita a martensita. (d) red completamente martensítica | 20 |
| Figura 2. Mecanismo del funcionamiento del efecto memoria de forma en las aleaciones SMA | 21 |
| Figura 3. Micrografías de la aleación Al-13%Cu-4%Ni tomada por (a) Microscopia óptica a 200 X y (b) Microscopia electrónica de barrido a 2000X. | 27 |
| Figura 4. Micrografías de la aleación Al-13%Cu-4%Ni-1%Y tomada por (a) por microscopia óptica a 200X y (b) Microscopia electrónica de barrido a 6000X. | 28 |
| Figura 5. Micrografías de la aleación Al-13%Cu-4%Ni-3%Y tomada por (a) Microscopia óptica a 200X y (b) Microscopia electrónica de barrido a 2000X (M=Martensita)..... | 29 |
| Figura 6. Micrografías de la aleación Al-13%Cu-4%Ni-5%Y tomada por (a) Microscopia óptica a 200X y (b) Microscopia electrónica de barrido a 2000X. | 30 |
| Figura 7. Análisis químico elemental de la aleación Cu-13%Al-4%Ni compuesto por (a) Zona de aplicación de la técnica EDS y (b) Espectros de energía dispersiva de rayos x. | 31 |
| Figura 8. Análisis químico elemental de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-1%Y compuesto por (a) Zona de aplicación de la técnica EDS y (b) Espectros de energía dispersiva de rayos x. | 32 |
| Figura 9. Análisis químico elemental de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-3%Y compuesto por (a) Zona de aplicación de la técnica EDS y (b) Espectros de energía dispersiva de rayos x. | 33 |
| Figura 10. Análisis químico elemental de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-5%Y compuesto por (a) Zona de aplicación de la técnica EDS y (b) Espectros de energía dispersiva de rayos x. | 34 |

Figura 11. Curva Nyquist de las aleaciones Cu-13%Al-4%Ni-xY.....37
Figura 12. Curvas de Taffel de las aleaciones Cu-13%Al-4%Ni-xY.....37

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Diseño experimental de las aleaciones Cu-Al-Ni y la variación del cuarto elemento aleante: Itrio. | 23 |
| Tabla 2. Resultados de composiciones químicas por MEB-EDS de las aleaciones Cu-Al-Ni-xY. | 34 |
| Tabla 3. Resultados de la prueba de dureza realizada para las cuatro aleaciones Cu-Al-Ni- xY. | 35 |
| Tabla 4. Parámetros electroquímicos para la resistencia a la corrosión de las aleaciones Cu-Al-Ni-xY. | 38 |
| Tabla 5. Velocidades de corrosion para las aleaciones Cu-Al-Ni-xY. | 38 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|---|-------------|
| ANEXO A. BALANCE DE CARGAS PARA LA FUNDICIÓN DE LAS ALEACIONES AL-CU-NI-XY. | 42 |
| ANEXO B. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO BASADO EN LA NORMA ASTM-E112. | 44 |
| ANEXO C. MICROGRAFÍA SEM CON ELECTRONES RETRODISPERSADOS A 6000X DE LOS NÓDULOS PRESENTES EN LA ALEACIÓN CU-13%AL-4%NI-1%Y. | 45 |
| ANEXO D. RESULTADO DE LA PRUEBA EDS REALIZADA PARA LA FASE ENCONTRADA EN LA ALEACIÓN CU-14%AL-4%NI-5%Y. | 46 |
| ANEXO E. CÁLCULO TIPO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRANSFERENCIA DE CARGA EN LA MUESTRA CU-13%AL-4%NI-1%Y MEDIANTE EL PROGRAMA EC-LAB V 10.19. | 47 |
| ANEXO F. MICROGRAFÍA SEM CON ELECTRONES SECUNDARIOS A 20000X DE LOS NÓDULOS PRESENTES EN LA ALEACIÓN CU-13%AL-4%NI-1%Y. | 48 |
| ANEXO G. DIAGRAMA DE FASES TERNARIO DE LA ALEACIÓN CU-AL-NI PARA DIFERENTES TEMPERATURAS. | 49 |
| ANEXO H. DIAGRAMA DE FASES TERNARIO DE LA ALEACIÓN CU-AL-NI PARA UNA DE TEMPERATURA DE 900 °C. | 50 |
| ANEXO I. DIAGRAMA DE EQUILIBRIO PARA LAS ALEACIONES CU-AL Y CU-AL-NI CON 4% EN PESO DE NÍQUEL. | 51 |

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE LA MICROESTRUCTURA Y RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE LA ALEACIÓN CON MEMORIA DE FORMA Cu-Al-Ni-Y ELABORADA POR FUNDICIÓN*

AUTORES: González Muñoz, Mario Alejandro
Arias Navarro, Sergio Esteban**

PALABRAS CLAVES: corrosión, horno de inducción, Itrio, martensita, memoria de forma, tamaño de grano.

DESCRIPCIÓN:

Las aleaciones con memoria de forma o SMA “Shape Memory Alloys” son aquellas que tienen la capacidad de sufrir una deformación pseudoplástica y regresar a su forma inicial una vez son expuestas a variaciones de temperatura. En el presente trabajo, se realizó el estudio de la adición de Itrio como cuarto elemento en la aleación con memoria de forma Cu-Al-Ni fabricada mediante un proceso de fundición en un horno de inducción, para ello se elaboraron cuatro probetas con diferentes porcentajes de Itrio que fueron sometidas a un análisis microestructural mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido con el fin de conocer el efecto del itrio en la microestructura y tamaño de grano de las aleaciones. Adicionalmente se llevó a cabo un ensayo de dureza y una espectroscopia de impedancia electroquímica electroquímica en una solución de NaCl al 3,5% en peso para determinar la resistencia a la corrosión de las aleaciones. Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a las aleaciones evidencian que el aumento en la cantidad de Itrio en la aleación Al-Cu-Ni, proporciona un refinamiento en el grano de la microestructura y un aumento en la dureza. En el análisis de la resistencia a la corrosión de las aleaciones Cu-Al-Ni-Y se determinó que la muestra con mayor resistencia a la transferencia de carga fue la aleación con 1% de Itrio.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de ingeniería Metalúrgica y ciencia de los materiales Director: Ph.D. Andrés Giovanni González

ABSTRAC

TITLE: STUDY OF MICROSTRUCTURE AND CORROSION RESISTANCE OF SHAPE MEMORY ALLOY Cu-Al-Ni-Y MADE BY CASTING*

AUTHORS: González Muñoz, Mario Alejandro
Arias Navarro, Sergio Esteban**

KEY WORDS: corrosion, induction furnace, Itrium, martensite, shape memory alloys, grain size.

DESCRITION:

The shape memory alloys are those that have the ability to undergo pseudoplastic deformation and return to their initial shape once exposed to temperature variations. In the present work, the study of the addition of Itrium as a fourth element in the Cu-Al-Ni memory alloy manufactured by means of a melting process in an induction furnace was carried out, for this purpose four specimens with different percentages were made of the Itrium that were subjected to a microstructural analysis by means of optical microscopy and scanning electron microscopy in order to know the effect of yttrium on the microstructure and grain size of the alloys. Additionally, a hardness test and electrochemical impedance spectroscopy were carried out in a 3.5% NaCl solution by weight to determine the corrosion resistance of the alloys. The results obtained in the tests carried out on the alloys show that the increase in the amount of Itrium in the Al-Cu-Ni alloy provides a refinement in the microstructure grain and an increase in hardness. In the analysis of the corrosion resistance of Cu-Al-Ni-Y alloys, it was possible to determine that the sample with the highest resistance to load transfer was the alloy with 1% in Itrium content.

* Degree project

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Ph.D. Andrés Giovanni González

INTRODUCCIÓN

En la actualidad las diferentes industrias como la aeronáutica, electrónica, y la médica, entre otras, requieren innovación de materiales que se ajusten a las exigentes condiciones de trabajo. De ahí, las aleaciones con memoria de forma conocidas por sus siglas en inglés como SMA (Shape Memory Alloy) son un grupo de materiales que por sus propiedades específicas proporcionan una gran variedad de soluciones en términos de resistencia, efectividad y diseño en los diferentes campos de aplicación. Las aleaciones con memoria de forma se caracterizan por su capacidad de sufrir deformación plástica y recuperar su estado original al ser sometidas a un calentamiento. Una de las aleaciones más utilizadas de este grupo es la aleación Ni-Ti (Nitinol), la cual tiene gran influencia en la industria médica por su biocompatibilidad. No obstante, las aleaciones Ni-Ti tienen como limitante un elevado costo en sus materias primas y presentan un proceso de fabricación de alta complejidad. Por estas razones en los últimos años se ha buscado suplir el sistema Ni-Ti por aleaciones con memoria de forma que ofrezcan un costo menor en su método de elaboración, entre las alternativas que se han encontrado están las aleaciones base cobre en especial el sistema Cu-Al-Ni, ya que poseen propiedades similares a las del nitinol y ofrecen un amplio rango de estabilidad térmica. Es importante mencionar que las aleaciones Cu-Al-Ni presentan un tamaño de grano grueso y son frágiles al ser obtenidas por el proceso de fundición convencional por su alta anisotropía elástica. Una manera de contrarrestar estas desventajas es la adición de un cuarto elemento aleante al sistema.

El presente proyecto se enfoca en la elaboración de una aleación con memoria de forma Cu-Al-Ni añadiendo itrio como cuarto elemento aleante en un proceso de fundición utilizando un horno de inducción eléctrica. A dicha aleación se le realizó

un estudio microestructural y de resistencia a la corrosión para analizar la influencia del itrio en el sistema.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la microestructura y resistencia a la corrosión de la aleación con memoria de forma Cu-Al-Ni-Y obtenida por el proceso de fundición.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los parámetros de fundición en las aleaciones con memoria de forma Cu-Al-Ni-Y.
- Estudiar la influencia de la adición de Itrio (Y) como cuarto elemento aleante en la microestructura de las aleaciones con memoria de forma del sistema Cu-Al-Ni.
- Determinar la resistencia de la corrosión generalizada de las aleaciones Cu-Al-Ni-Y mediante la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica en una solución de NaCl al 3,5% en peso.

2. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE ANTECEDENTES

2.1 ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA

Se denominan aleaciones con memoria de forma o SMA “Shape Memory Alloys” a las aleaciones que poseen la capacidad de sufrir una deformación severa y volver a su forma original una vez son expuestas al calor. Debido a su interesante comportamiento, las aleaciones con memoria de forma han sido objeto de estudio desde hace más de cincuenta años, siendo la aleación Al-Cd en 1932 la primera en ser elaborada. Pasaron unos cuantos años para encontrar en 1962, el descubrimiento de la aleación Ni-Ti (Nitinol), sus excelentes propiedades y aplicaciones la convierten en una aleación fundamental para el avance en la investigación y desarrollo de las SMA ¹.

2.2 TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA

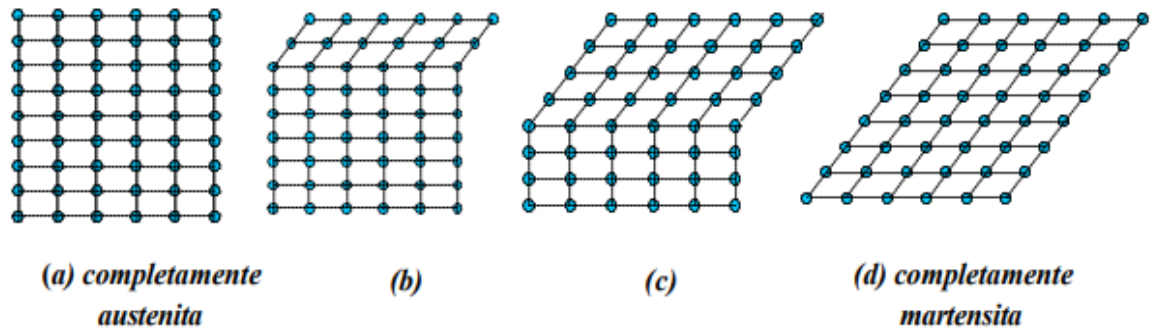
La transformación de una fase austenítica de elevada temperatura a una fase martensítica de temperatura baja se denomina transformación martensítica termoelástica. Esta transformación permite que las SMA tengan la capacidad de recuperar su forma original al ser sometidas a un calentamiento ². La transformación martensítica ocurre partiendo de una elevada temperatura (M_s) en donde la fase presente es austenita (A), posteriormente, se realiza un enfriamiento hasta una temperatura (M_f) obteniendo la fase martensita (M). Esta transformación presenta un mecanismo desplazativo caracterizado por tener un reordenamiento de los

¹ DUERIG, T. E; MELTON, K. N; STOCKEL, D. y WAYMAN, C. M. Engineering aspects of shape memory alloys 1990

² ORDOÑEZ, B. corrosión de aleaciones con memoria de forma de los sistemas cu-al-ni y cu-zn-al: un estudio basado en la literatura: Universidad industrial de Santander; 2018

átomos en una nueva estructura cristalina más estable sin experimentar difusión (Ver Figura 1). Cristalográficamente, la transformación se divide en dos partes: la deformación de la red cristalina que consiste en el movimiento coordinado de los átomos para generar la nueva estructura y la cizalladura invariante de la red. Es importante mencionar que cuando se requiere precisar una transformación inversa para pasar de la fase martensita a la fase austenita es necesario un calentamiento que parte de la temperatura inicial (A_s) hasta llegar a la temperatura final (A_f)³.

Figura 1. (a) Red completamente austenítica. (b) y (c) transformación de la red de austenita a martensita. (d) red completamente martensítica



Fuente: LÓPEZ Silvia de la Flor. Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. 2005

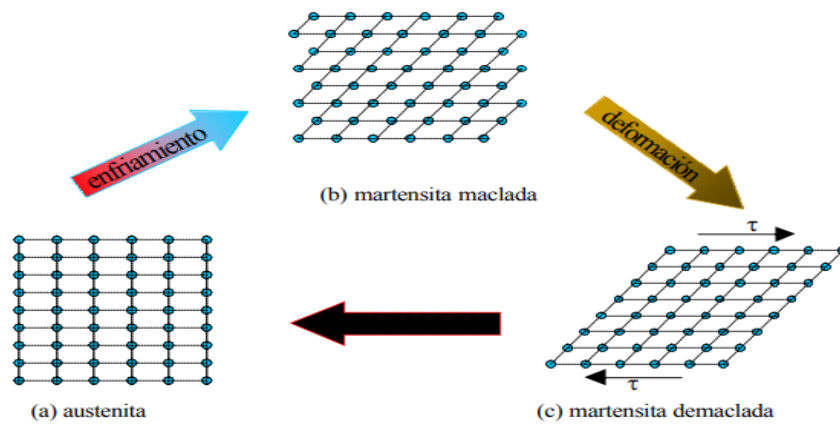
2.3 MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO

El mecanismo de transformación desplazativo de la martensita implica que esta fase sea menos simétrica que la austenita, esto hace posible que la formación de martensita a partir de austenita sea más sencilla que la transformación inversa.

³ LÓPEZ Silvia de la Flor. Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. 2005

Una vez sucede la transformación martensítica se genera una red de átomos con su respectivo ordenamiento y la deformación del material origina una migración de las fronteras de maclado en la red. El resultado es una distribución preferente de los átomos que permite por medio de un calentamiento hasta la temperatura (A_f) un retorno a la fase austenítica.

Figura 2. Mecanismo del funcionamiento del efecto memoria de forma en las aleaciones SMA



Fuente: LÓPEZ Silvia de la Flor. Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. 2005

2.4 TIPOS DE ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA

- **Ni-Ti (Nitinol):** Es una de las SMA más comunes, se destaca por su buena capacidad de memoria de forma alcanzando hasta un 8% de recuperación. Además, posee buena resistencia a la corrosión y estabilidad en aplicaciones cíclicas. Su rango de temperatura llega hasta los 100°C, debido a su solubilidad

puede combinarse con un tercer elemento para mejorar sus propiedades y rango térmico ⁴.

- **Aleaciones base cobre:** En este grupo se encuentran dos aleaciones muy importantes, el sistema Cu-Al-Ni y el Cu-Zn-Al. Estas aleaciones poseen capacidad de memoria de forma cercana al 5%, su rango de transformación martensítica varía a más de 200°C para las Cu-Al-Ni y de 100°C para las Cu-Zn-Al. Sin embargo, esta clase de aleaciones de base cobre presentan problemas de fragilidad debido a su gran tamaño de grano y anisotropía elástica ⁵

2.5 MÉTODOS DE FABRICACIÓN

- **Fundición:** La fundición es uno de los métodos más empleados en la fabricación de aleaciones con memoria de forma, se utiliza una ruta de colada convencional donde los elementos puros se funden en hornos de inducción bajo atmósferas controladas, seguidamente, la aleación se vierte en moldes, luego se realiza la homogenización y mecanizado para finalizar con el proceso. La principal desventaja que presenta este método es que se produce una estructura de grano grande lo que genera que el material presente fragilidad y sea susceptible de agrietarse intergranularmente ⁶.
- **Pulvimetalurgia:** Para este método el material de partida es metal o aleación en polvo que se va a compactar mediante procesos de sinterización, esta ruta de fabricación ofrece un mejor control en la composición del material y un tamaño de grano fino, sin embargo, su aplicación comercial se ha visto obstaculizada, debido al alto costo de los polvos metalúrgicos que se utilizan en el proceso ⁷.

⁴ Ibid.

⁵ AGRAWAL A., DUBE R.K., Methods of fabricating Cu-Al-Ni shape memory alloys, Journal of Alloys and Compounds 2018, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.03.390

⁶ Ibid.

⁷ Ibid.

3. METODOLOGÍA

3.1 OBTENCIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

Para la realización del proyecto se utilizaron las materias primas como: cobre en forma granular, aluminio en forma de alambres, níquel en polvo e itrio en gránulos. Todos los elementos fueron adquiridos con un grado de pureza del 99%. Fue necesaria la reducción del tamaño en las materias primas como Aluminio e Itrio, para ello se utilizó una cortadora manual.

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL DE LAS ALEACIONES PRINCIPALES

Una vez obtenidas las materias primas, se diseñaron las aleaciones propuestas en la elaboración del proyecto, partiendo de la aleación base Cu-Al-Ni donde se fue agregando el elemento Itrio Y como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Diseño experimental de las aleaciones Cu-Al-Ni y la variación del cuarto elemento aleante: Itrio.

| | ALEACIÓN | Y (itrio)% |
|----------|------------------|-------------------|
| 1 | Cu-13%Al-4%Ni-xY | x=0% |
| 2 | Cu-13%Al-4%Ni-xY | x=1% |
| 3 | Cu-13%Al-4%Ni-xY | x=3% |
| 4 | Cu-13%Al-4%Ni-xY | x=5% |

3.3 FABRICACIÓN DE LAS ALEACIONES

Para la fabricación de las aleaciones se estableció que cada muestra debía tener un peso de 40 g para no exceder la capacidad del crisol de grafito con dimensiones de 4 centímetros de largo y 1.2 centímetros de diámetro.

Se prepararon las cargas de las cuatro aleaciones establecidas en el diseño experimental de la tabla 1 con base en un balance de masas (Ver Anexo A), posteriormente se depositó la carga en el horno de inducción eléctrica FURNAX T modelo 26302 donde alcanzó una temperatura aproximadamente de 1550°C durante 15 minutos. Una vez se transcurrido el tiempo de fundición se retiró la muestra solidificada del crisol y se repitió el procedimiento, es decir, las aleaciones fueron fundidas dos veces para asegurar su homogenización.

3.4 APLICACIÓN DE FORJA Y TRATAMIENTO TÉRMICO

Una vez fundidas las aleaciones se llevó a cabo una forja en caliente con el fin de facilitar su caracterización metalográfica. Posteriormente, se aplicó un tratamiento térmico de temple que consistió de un calentamiento de las muestras hasta una temperatura de 900°C con un sostenimiento de 1 hora en una atmosfera de aire y enfriamiento en agua con hielo con el fin de obtener una estructura martensítica ⁸.

3.5 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MICROESTRUCTURAL

Para la preparación metalográfica las muestras fueron desbastadas por lijas de diferentes granulometrías comenzando desde la lija 80, hasta la lija 1500. Seguido

⁸ Ibid.

de un pulido en paños con alúmina de 1 μm y 0,05 μm respectivamente. La microestructura de las muestras se reveló mediante la inmersión en cloruro férrico. El análisis microestructural se realizó por medio de la técnica microscopía óptica, donde se utilizó un microscopio metalúrgico invertido OLIMPUS GX 41 con aumento máximo de 1500X. La preparación de las muestras fue ejecutada bajo los estándares de la norma ASTM E3-01 ⁹.

Para realizar una profundización en el análisis microestructural las muestras fueron llevadas al microscopio electrónico de barrido Quanta FEG 650 que contaba con los siguientes parámetros de operación: Alto vacío, voltaje de aceleración de 15 Kv, electrones secundarios característicos para observar morfología y electrones retro dispersados para observar variaciones de composición.

En el análisis químico EDS, se utilizó un voltaje de aceleración de 15kV, un detector EDAX APOLO X con resolución de 126,1 Ev, como también el Software EDX Génesis que proporciona información semi-cuantitativa de los elementos químicos.

3.6 ENSAYO DE DUREZA

Cada una de las probetas fue sometida a cinco mediciones de dureza en escalas HRB y HRC utilizando un indentador de cono de diamante de 1/16 con carga de 100kg en un durómetro Rockwell modelo 4TT. La prueba de dureza se llevó a cabo siguiendo los estándares de la norma ASTM E 18-08 b ¹⁰.

⁹ ASTM E3-95 Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens

¹⁰ ASTM E18-15 Standard test methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials

3.7 RESISTENCIA A LA CORROSIÓN

Para iniciar el montaje de la prueba, fue necesario soldar cada probeta con 20 centímetros de cable AWG #22 y posteriormente las muestras fueron montadas en resina epóxica y desbastadas hasta una granulometría de lija 600. Como segunda medida se preparó la solución de NaCl 3,5 % en peso, para ello se depositaron en un vaso precipitado 3,564 g de NaCl en 400 ml de agua desionizada seguido de un proceso de agitación a 400 rpm durante 35 minutos hasta obtener la solución. En la instalación del sistema para la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica se utilizó un potencióstato GAMRY interface 1000 acoplado a una celda electroquímica compuesta por la aleación que actúa como electrodo de trabajo, un contra electrodo de platino, un electrodo de referencia de calomelano saturado (SCE), y un electrolito acuoso de NaCl al 3,5% en peso ¹¹.

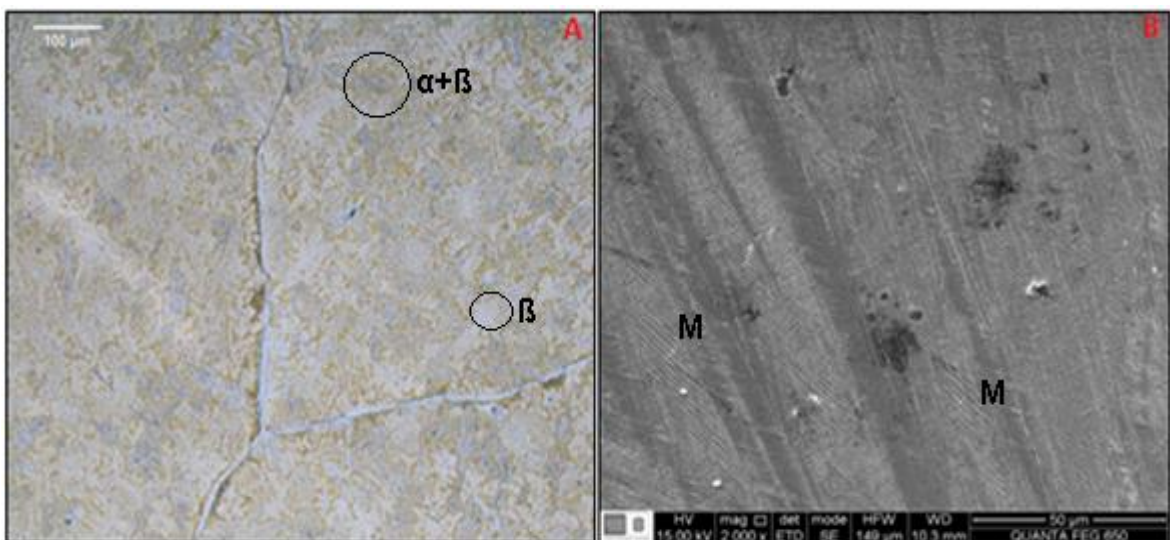
¹¹ ASTM G102-89 Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measuremen.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LA ALEACIÓN Cu-13%Al-4%Ni

En la figura 3, se muestra la microestructura de la aleación de Al-13%Cu-4%Ni. En la Figura 3(a) se logra evidenciar una solución sólida β de aluminio en cobre con algunos precipitados de fase β y α , como también se pueden apreciar en la micrografía los límites de grano de la muestra. Para el tamaño de grano de la aleación se obtuvo un valor de $n = 3$, el cuál fue determinado de acuerdo con la norma ASTM E112 (Ver Anexo B). Por otro lado, la figura 3(b), se muestra una micrografía tomada a mayores aumentos mediante la técnica microscopía electrónica de barrido, donde se puede observar de manera más detallada la fase β y una fase acicular de martensita producto del tratamiento térmico de temple.

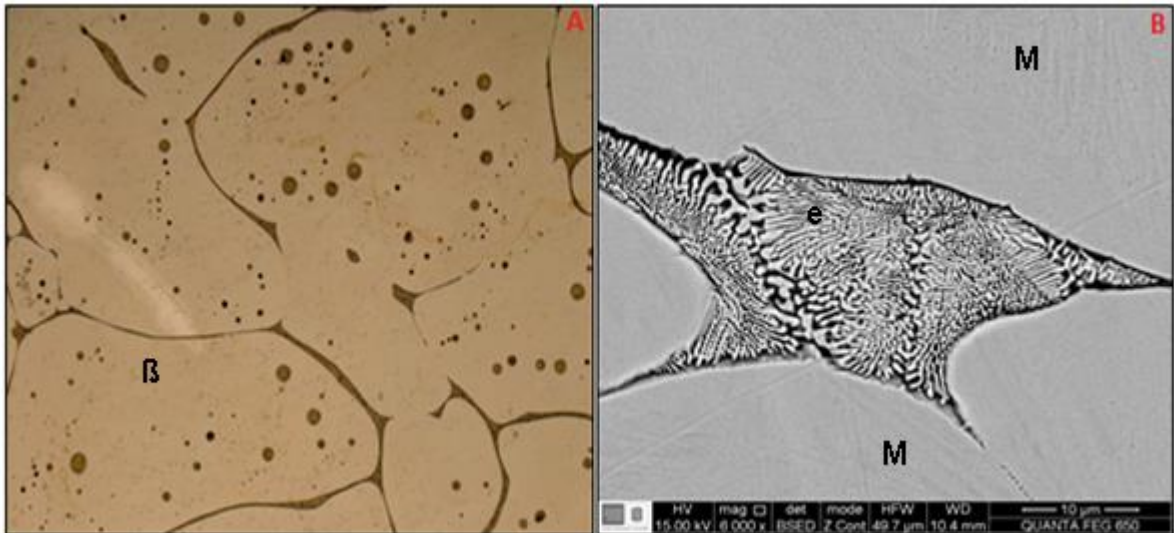
Figura 3. Micrografías de la aleación Al-13%Cu-4%Ni tomada por (a) Microscopia óptica a 200 X y (b) Microscopia electrónica de barrido a 2000X.



4.2 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LA ALEACIÓN Cu-13%Al-4%Ni-1%Y

En la figura 4 se muestra la microestructura de la aleación Al-13%Cu-4%Ni-1%Y. En la figura 4(a) se observa una matriz β rica en cobre con precipitados adyacentes a los límites de grano y una serie de glóbulos distribuidos de manera uniforme en la superficie de la muestra, similar a la ferrita idiomorfa presentada en los aceros. Haciendo esta similitud, esta aleación presenta una nucleación (idiomorfa) dentro de los granos (Ver Anexo C), así como en los límites de grano. La figura 4(b) permite detallar a mayores aumentos los precipitados en los límites de grano mostrando la formación de una fases claras y oscuras en forma de láminas mezcladas, siendo este tipo de microestructuras características de una formación eutéctica, adicionalmente se observa la presencia de martensita en la matriz de la aleación (denotada en la Figura 4b como M). Para esta muestra se determinó el tamaño de grano con un valor de $n = 5$.

Figura 4. Micrografías de la aleación Al-13%Cu-4%Ni-1%Y tomada por (a) por microscopia óptica a 200X y (b) Microscopia electrónica de barrido a 6000X.

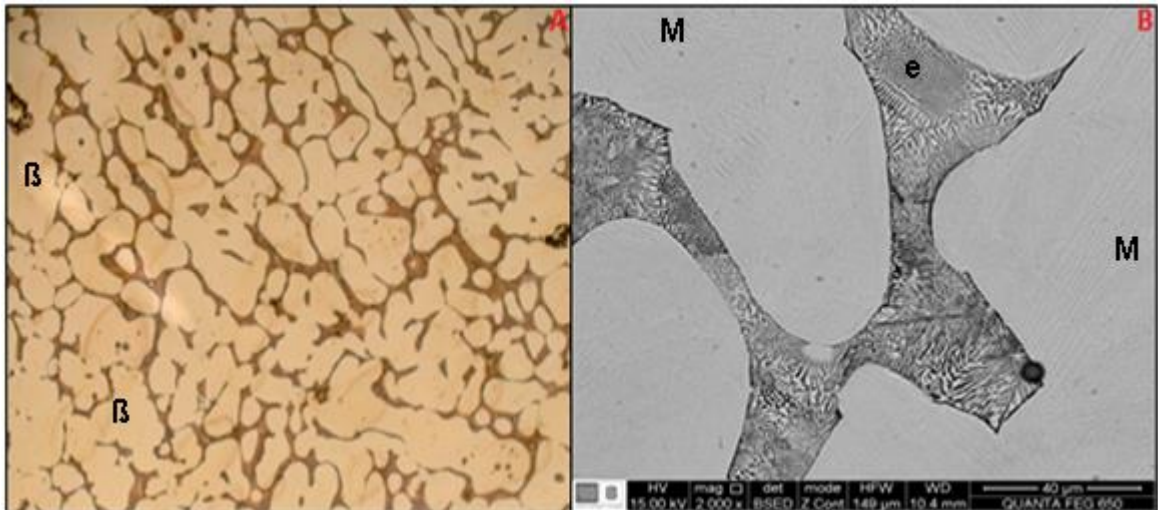


4.3 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LA ALEACIÓN Cu-13%Al-4%Ni-3%Y

En la figura 5 se muestra la microestructura de la aleación Al-13%Cu-4%Ni-3%Y.

En la figura 5(a), se observa cómo se mantiene la matriz β y una nucleación del eutéctico en los límites de grano proporcionando una disminución significativa en el tamaño de grano de la aleación. También se puede evidenciar la ausencia de los nódulos o núcleos referenciados anteriormente en la figura 4(a) debido a una migración del eutéctico hacia los límites de grano. En la figura 5(b), se puede evidenciar el aumento de la fase eutéctica en el límite de grano con respecto a la descrita en la figura 4(b), así como también es posible observar en la matriz la presencia de martensita fina en diferentes direcciones. Para esta aleación se determinó su tamaño de grano y se obtuvo un valor de $n = 6$.

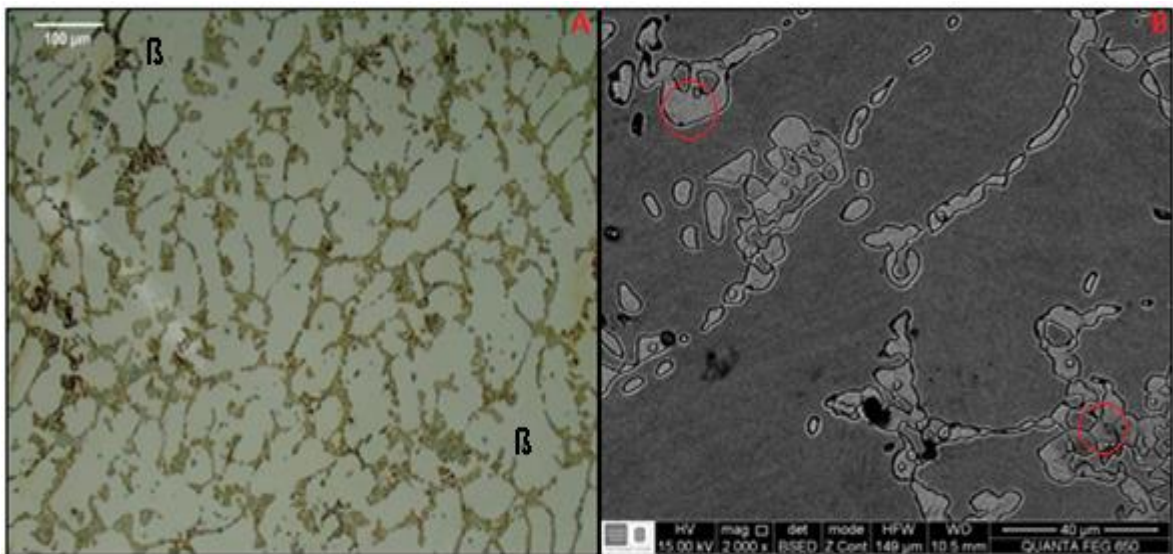
Figura 5. Micrografías de la aleación Al-13%Cu-4%Ni-3%Y tomada por (a) Microscopia óptica a 200X y (b) Microscopia electrónica de barrido a 2000X (M=Martensita).



4.4 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LA ALEACIÓN Cu-13%Al-4%Ni-5%Y

La figura 6 se muestra la microestructura de la aleación Al-13%Cu-4%Ni-5%Y. En la figura 6(a), se puede observar que se mantiene la matriz β y se presenta un refinamiento en el tamaño de grano con respecto a las aleaciones anteriormente analizadas. Además, la figura 6(b) permite observar un límite de grano sin presencia de la fase eutéctica, por el contrario se presenta una sola fase que al ser analizada mediante la técnica EDS arroja cantidades de Itrio cercanas al 20% (Ver Anexo D), siendo las cantidades de itrio más altas encontradas en todas las aleaciones. Además se calculó el valor del tamaño de grano y se obtuvo un valor de $n = 7$.

Figura 6. Micrografías de la aleación Al-13%Cu-4%Ni-5%Y tomada por (a) Microscopia óptica a 200X y (b) Microscopia electrónica de barrido a 2000X.



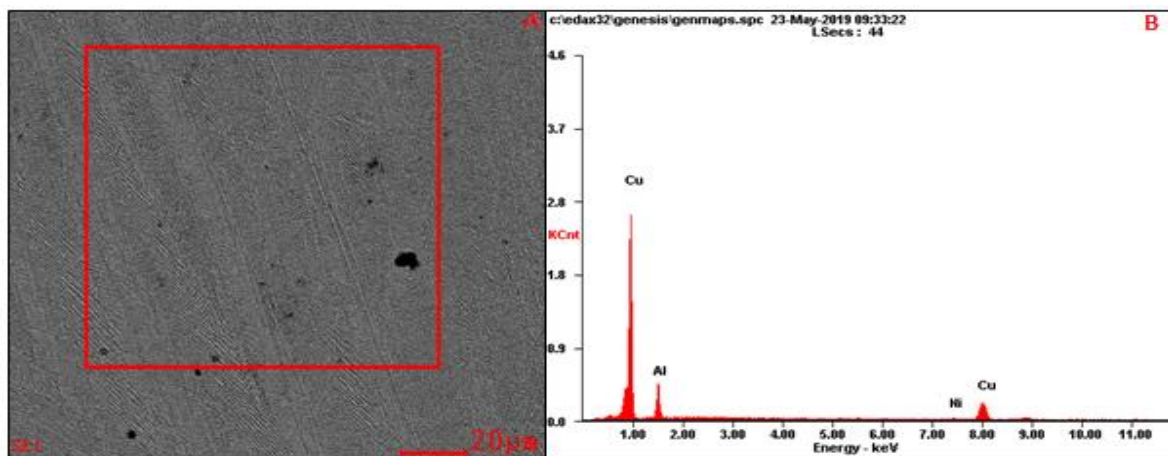
4.5 ANÁLISIS QUÍMICO ELEMENTAL DE LAS ALEACIONES

Para el análisis químico elemental de las cuatro aleaciones analizadas se implementó la técnica espectrometría de dispersión de energía de rayos x (EDS) con el fin de verificar la composición química propuesta para cada aleación.

4.5.1 Análisis químico elemental de la aleación Cu-13%Al-4%Ni. En la figura 7 se muestra la zona donde se realizó la toma de composición química generalizada de la aleación Al-13%Cu-4%Ni y el diagrama EDS.

En la figura 7 (a) se muestra la zona seleccionada para la toma de composición química. En la figura 7 (b) se observa el diagrama de espectros de los elementos químicos en la aleación. Los resultados de la prueba de composición química generalizada de la aleación Cu-13%Al-4%Ni fueron: Cu: 81,66%, Al:13,75% Ni:4,58%. Estos resultados obtenidos mediante la caracterización química EDS son cercanos a los planteados inicialmente en el diseño de la aleación.

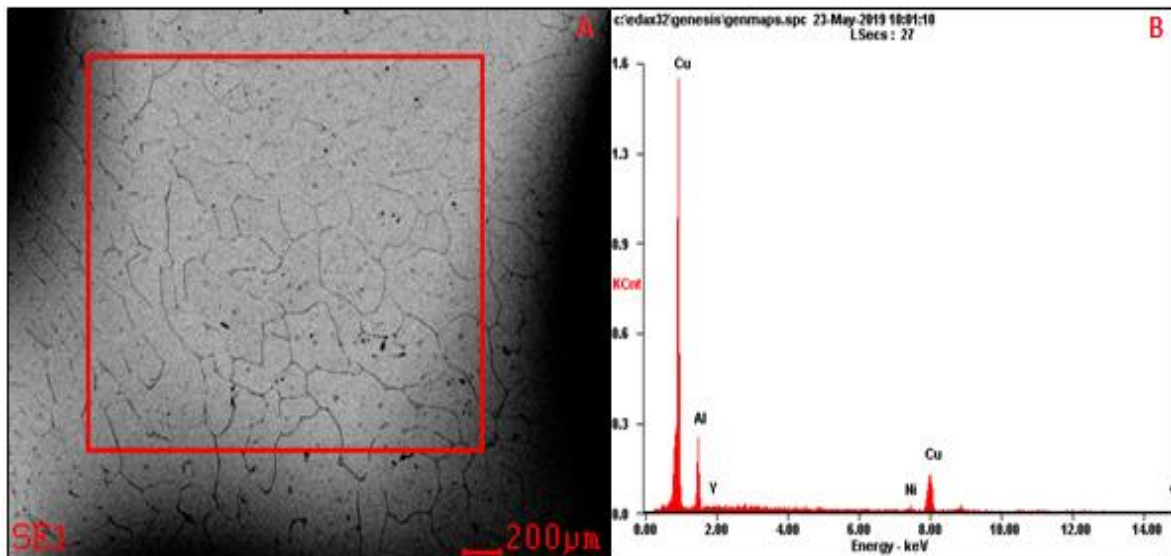
Figura 7. Análisis químico elemental de la aleación Cu-13%Al-4%Ni compuesto por (a) Zona de aplicación de la técnica EDS y (b) Espectros de energía dispersiva de rayos x.



4.5.2 Análisis químico elemental de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-1%Y. En la figura 8 se muestra la zona donde se realizó la toma de composición química generalizada de la aleación Al-13%Cu-4%Ni-1%Y y el diagrama EDS.

En la figura 8(a), se muestra la zona donde se aplicó la técnica EDS la cual esta compuesta por glóbulos nodulares, granos y límites de granos con presencia de eutéctico. En la figura 8(b) se observa el diagrama de espectros de los elementos químicos presentes en la aleación, cuantitativamente se obtuvieron valores de: Cu: 86,06%, Al: 9,73%, Ni: 3,37%, Y: 0,85%. Los resultados muestran una disminución en la cantidad de Al y Cu, la cual es atribuida al proceso de fundición.

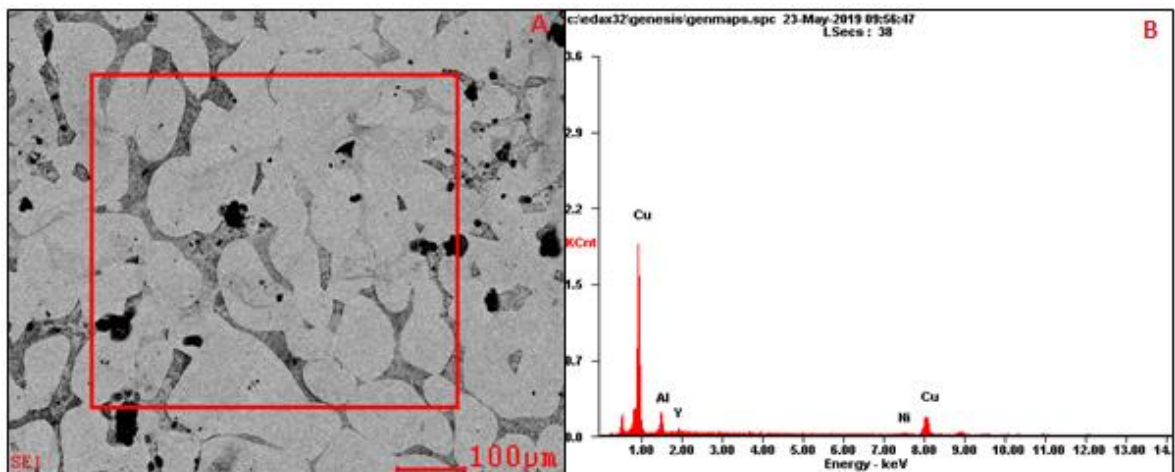
Figura 8. Análisis químico elemental de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-1%Y compuesto por (a) Zona de aplicación de la técnica EDS y (b) Espectros de energía dispersiva de rayos x.



4.5.3 Análisis químico elemental de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-3%Y. En la figura 9 se muestra la zona donde se realizó la toma de composición química generalizada de la aleación Al-13%Cu-4%Ni-3%Y y el diagrama EDS.

La figura 9 (a) permite evidenciar la zona seleccionada para realizar la técnica EDS en donde se caracteriza por la presencia de la matriz β y eutéctico en los límites de grano. En la figura 8 (b) se observa el diagrama de espectros de los elementos químicos en la aleación. Los valores cuantitativos de los elementos presentes en la muestra fueron los siguientes: Cu: 83,28%, Al: 8,72%, Ni:5,16%, Y: 2,84%. Los resultados permiten analizar que en esta aleación se presenta la mayor pérdida de Al con respecto a las demás, los porcentajes de los elementos Cu y Ni no varían significativamente y la cantidad de Itrio es muy cercana a la esperada en los balances de masa iniciales.

Figura 9. Análisis químico elemental de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-3%Y compuesto por (a) Zona de aplicación de la técnica EDS y (b) Espectros de energía dispersiva de rayos x.

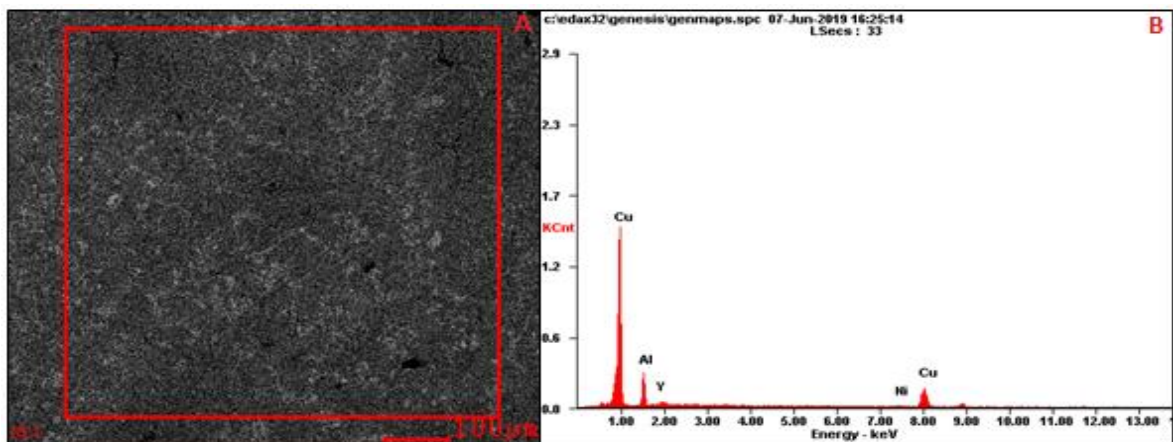


4.5.4 Análisis químico elemental de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-5%Y. En la figura 10 se muestra la zona donde se realizó la toma de composición química generalizada de la aleación Al-13%Cu-4%Ni-5%Y y el diagrama EDS.

En la figura 10 (a) se puede observar una zona principalmente compuesta por la matriz β . En la Figura 10 (b) se presenta el diagrama de espectros para los elementos químicos de la aleación a la cual se le realizó un análisis cuantitativo,

donde se obtuvieron los siguientes resultados: Cu: 77,38%, Al:12,15%, Ni: 6,53%, Y: 3,94 %. Los resultados muestran que en esta aleación se encontró la mayor cantidad de Niquel de todas las aleaciones, por otro lado, se presentó la mayor disminución de cobre y el valor más lejano de Itrio con respecto al planteado en el diseño inicial de la aleación. Esto pudo ser posible debido a un alto grado de oxidación que se presenta en el itrio.

Figura 10. Análisis químico elemental de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-5%Y compuesto por (a) Zona de aplicación de la técnica EDS y (b) Espectros de energía dispersiva de rayos x.



En la tabla 2, se presenta un resumen del análisis químico elemental para las cuatro aleaciones con memoria de forma obtenido mediante la técnica MEB-EDS.

Tabla 2. Resultados de composiciones químicas por MEB-EDS de las aleaciones Cu-Al-Ni-xY.

| Cu-13%Al-4Ni-xY | Porcentaje en peso de los elementos (%Wt) | | | |
|-----------------|---|-------|------|------|
| | Cu | Al | Ni | Y |
| Y= 0% | 81,66 | 13,75 | 4,58 | 0 |
| Y= 1% | 86,06 | 9,73 | 3,37 | 0,85 |
| Y= 3% | 83,28 | 8,72 | 5,16 | 2,84 |
| Y= 5% | 77,38 | 12,15 | 6,53 | 3,94 |

4.6 ANÁLISIS DE DUREZA

Los valores de la prueba de dureza en escalas HRB y HRC realizada en un durometro Wilson Rockwell con una carga de 100kg y un indentador cono de diamante, son mostrados en la Tabla 3.

En la prueba de dureza realizada se logra observar que la muestra con menor dureza fue la aleación Cu-13%Al-4%Ni con un valor de 90,4 HRB. En el caso de las aleaciones con adición de itrio, la muestra que presentó una mayor dureza fue la aleación Cu-13%Al-4%Ni-5%Y con un valor de 28 HRC. El comportamiento de las aleaciones muestra que al aumentar el porcentaje del cuarto elemento aleante Itrio, aumenta considerablemente el valor de la dureza con respecto a la aleación base.

Tabla 3. Resultados de la prueba de dureza realizada para las cuatro aleaciones Cu-Al-Ni- xY.

| Cu-13%Al-4Ni-xY | Ensayo de dureza | | | | | |
|-----------------|------------------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| | Toma 1 | Toma 2 | Toma 3 | Toma 4 | Toma 5 | Toma promedio |
| Y= 0% | 93 | 87 | 92 | 88 | 92 | 90,4 HRB |
| Y= 1% | 23 | 22 | 23 | 23 | 23 | 22,8 HRC |
| Y= 3% | 24 | 23 | 24 | 23 | 24 | 23,6 HRC |
| Y= 5% | 28 | 27 | 28 | 28 | 29 | 28 HRC |

4.7 ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA CORROSIÓN POR IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA

Se analizó la resistencia a la corrosión de las aleaciones Cu-13%Al-4%Ni-xY mediante tres técnicas electroquímicas: Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS, del inglés *Electrochemical Impedance Spectroscopy*) (Ver Anexo E), Curvas de polarización con extrapolación de pendientes Tafel (Tafel) y

Resistencia de Polarización Lineal (LPR, del inglés *Linear Polarization Resistance*). En los ensayos se utilizó un electrodo de referencia de calomel saturado (SCE, del inglés *Saturated Calomel Electrode*) y un contra-electrodo de platino. Los ensayos se realizaron por duplicado y se analizó el resultado promedio.

Las Figuras 11 y 12 muestran respectivamente los diagramas de Nyquist y las curvas de polarización obtenidas experimentalmente. La Tabla 4 muestra los coeficientes de Tafel, calculados mediante el método de extrapolación de pendientes Tafel, la resistencia de transferencia de carga con EIS, mediante el corte con el eje real de una regresión circular a los datos y la resistencia de polarización con LRP, calculada mediante regresión lineal. Finalmente, la Tabla 5 muestra las velocidades de corrosión calculadas de acuerdo con la norma ASTM G-102, asumiendo una densidad de $8,96 \text{ g/cm}^2$ y unos pesos equivalentes de 34.42, 34.48, 34.01 y 33.67. Como se observa en la Tabla 5, la adición de 1% de itrio disminuye la velocidad de corrosión, sin embargo, mayores adiciones de itrio muestran el efecto contrario. Relacionando este comportamiento con la microestructura, se puede analizar que una de la causa de la disminución de la velocidad de corrosión se puede debe a los núcleos que presentaba esta aleación dentro de sus granos. Por otra parte, en la figura 12 se evidencia que, en las aleaciones con presencia de Itrio, el potencial de corrosión se desplaza negativamente, indicando una menor estabilidad termodinámica, que resulta en una mayor susceptibilidad a la corrosión, comparada con la aleación base Al-Cu-Ni.

Figura 11. Curva Nyquist de las aleaciones Cu-13%Al-4%Ni-xY.

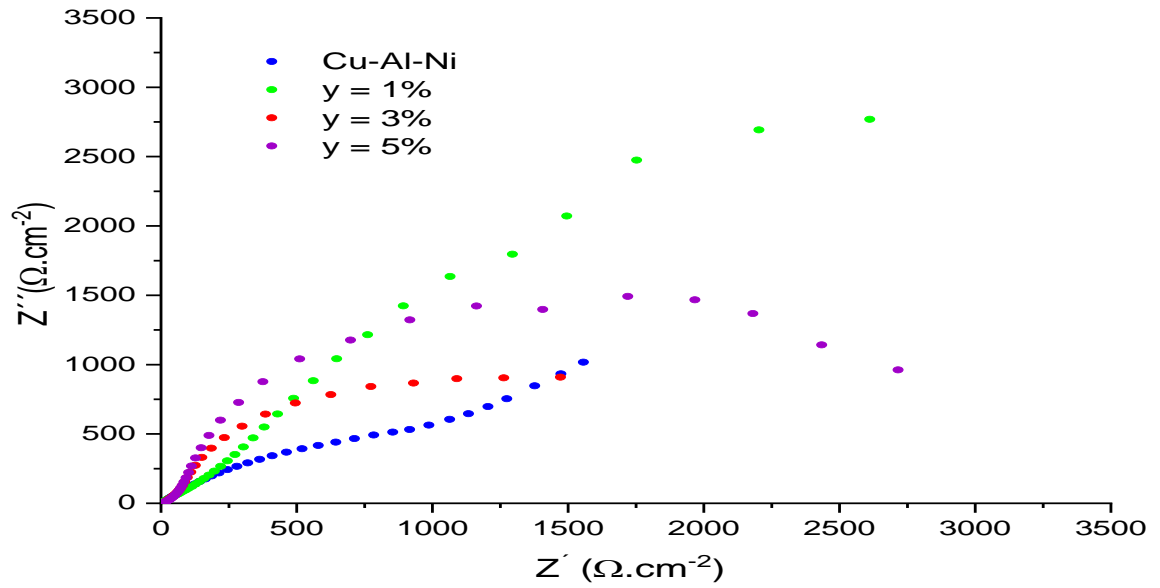


Figura 12. Curvas de Taffel de las aleaciones Cu-13%Al-4%Ni-xY.

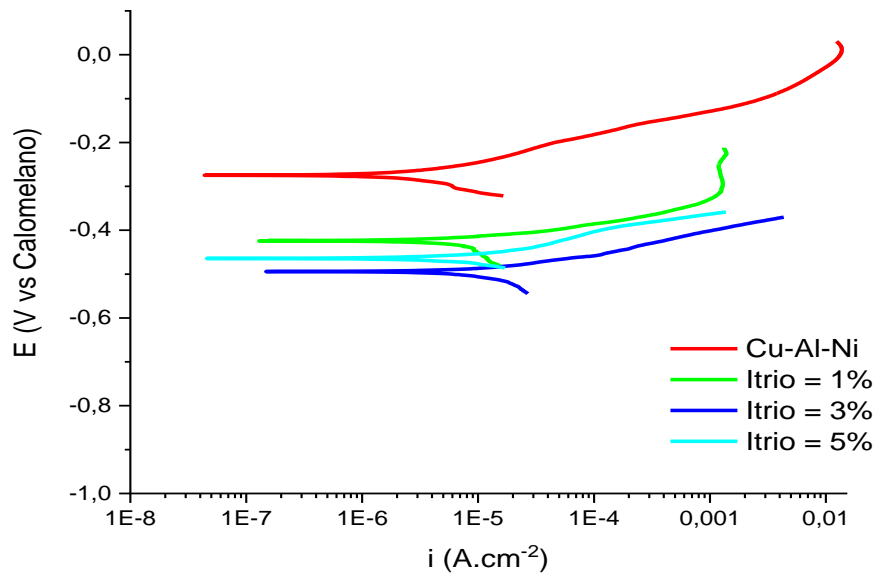


Tabla 4. Parámetros electroquímicos para la resistencia a la corrosión de las aleaciones Cu-Al-Ni-xY.

| Aleación | icorr ($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$) | β_c ($\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1}$) | β_a ($\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1}$) | Rtc EIS ($\Omega\cdot\text{cm}^2$) | Rtc LPR ($\Omega\cdot\text{cm}^2$) |
|--------------------------|--|--|--|--|--|
| Cu-13%Al-4%Ni | 5,099 | 282,2 | 57,7 | 6273 | 5877,5 |
| Cu-13%Al-4%Ni-1%Y | 4,902 | 230 | 39 | 8274 | 11459 |
| Cu-13%Al-4%Ni-3%Y | 15,077 | 177,3 | 54,2 | 2186 | 2089 |
| Cu-13%Al-4%Ni-5%Y | 9,09 | 307,4 | 35,8 | 3598 | 3558 |

Tabla 5. Velocidades de corrosión para las aleaciones Cu-Al-Ni-xY.

| Aleación | Velocidad de corrosión mediante EC-Lab (μpy) | Velocidad de corrosión por norma ASTM G102-89 (μpy) |
|--------------------------|---|--|
| Cu-13%Al-4%Ni | 49,7023 | 44,1139 |
| Cu-13%Al-4%Ni-1%Y | 47,4791 | 42,0065 |
| Cu-13%Al-4%Ni-3%Y | 187,252 | 164,8157 |
| Cu-13%Al-4%Ni-5%Y | 93,1389 | 87,7751 |

5. CONCLUSIONES

- Los parámetros descritos en la metodología para la fabricación de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-xY por medio de un horno de inducción se cumplieron, sin embargo para porcentajes mayores a 3% de Itrio se recomienda un aumento en la temperatura de fundición debido a que se encontraron algunas zonas en la muestra de 5% de Itrio con altas concentraciones del elemento sin fundir.
- El estudio microestructural de las aleaciones Cu-13%Al-4%Ni-xY mediante la técnica de microscopía óptica permitió observar un refinamiento en el tamaño de grano a medida que se aumenta el porcentaje de Itrio, al mismo tiempo ocurre un aumento de una fase rica en itrio en el límite de grano.
- Mediante el ensayo de dureza realizado a cada una de las aleaciones, se logró evidenciar que a medida que incrementó la presencia de Itrio en la aleación base, incrementa su dureza.
- En el análisis de la resistencia a la corrosión de las aleaciones Cu-Al-Ni-Y mediante la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica, se encontró que la muestra con mayor resistencia a la transferencia de carga fue la aleación con 1% de Itrio, esto puede ser explicado por la presencia de eutéctico tanto en los límites de grano como en los nódulos precipitados en la matriz.

BIBLIOGRAFÍA

AGRAWAL A., DUBE R.K., Methods of fabricating Cu-Al-Ni shape memory alloys, Journal of Alloys and Compounds, 2018 doi: 10.1016/j.jallcom.2018.03.390

ASM HANDBOOK. Alloy phase diagrams. Volume 3. ASM international 1992

ASTM E112 - Standard Test Methods for Determining Average Grain Size

ASTM E18-15 Standard test methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.

ASTM E3-95 Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens.

ASTM G102-89 Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements.

ASTM G106-89 Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements.

ASTM G5-14 Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements

ASTM G59-97 Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements

CARRANZA, R. técnicas electroquímicas para la determinación de la velocidad de corrosión.

DUERIG, T. E; MELTON, K. N; STOCKEL, D. y WAYMAN, C. M. (1990),
Engineering aspects of shape memory alloys.

LEXCELLENT, C. Shape-Memory Alloys Handbook London: John Wiley & Sons,
Incorporated; 2013.

LÓPEZ Silvia de la Flor. Simulación numérica y correlación experimental de las
propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma. PhD thesis,
Universitat Politècnica de Catalunya. 2005

SURU, M., et al. Precipitation Effects on the Martensitic Transformation in a CuAl-
Ni Shape Memory Alloy. Journal of Materials Engineering and Performance. 2016
April

ORDOÑEZ, B. corrosión de aleaciones con memoria de forma de los sistemas cu-
al-ni y cu-zn-al: un estudio basado en la literatura: Universidad industrial de
Santander; 2018.

OTSUKA, K. y WAYMAN, C. M. Shape Memory Materials: Cambridge University
Press; 1999.

TOBUSHI, H. et al. Mechanical Properties of Shape Memory Materials New York:
Nova Science Publishers, Inc.; 2013.

VALENCIA, A. Transformaciones de fase en metalurgia Medellin: Universidad de
Antioquia; 1998

YAWNY, A.; SADE, M. y LOVEY, F.C. Conceptual design of actuator applications
with Cu–Zn–Al single crystals. Materials Science and Engineering. 1999.

.

ANEXOS

ANEXO A. BALANCE DE CARGAS PARA LA FUNDICIÓN DE LAS ALEACIONES Al-Cu-Ni-xY.

Para la fabricación de las cuatro aleaciones se tomó valor de 40 g como base de la carga debido a la capacidad del crisol.

Aleación Cu-13%Al-4%Ni:

$$\text{Cu} = 40\text{g} * 0,83 = 33,2 \text{ g}$$

$$\text{Al} = 40\text{g} * 0,13 = 5,2 \text{ g}$$

$$\text{Ni} = 40\text{g} * 0,04 = 1,6 \text{ g}$$

Aleación Cu-13%Al-4%Ni-1%Y:

$$\text{Cu} = 40\text{g} * 0,82 = 32,8 \text{ g}$$

$$\text{Al} = 40\text{g} * 0,13 = 5,2 \text{ g}$$

$$\text{Ni} = 40\text{g} * 0,04 = 1,6 \text{ g}$$

$$\text{Y} = 40\text{g} * 0,01 = 0,4 \text{ g}$$

Aleación Cu-13%Al-4%Ni-3%Y:

$$\text{Cu} = 40\text{g} * 0,80 = 32 \text{ g}$$

$$\text{Al} = 40\text{g} * 0,13 = 5,2 \text{ g}$$

$$\text{Ni} = 40\text{g} * 0,04 = 1,6 \text{ g}$$

$$\text{Y} = 40\text{g} * 0,03 = 1,2 \text{ g}$$

Aleación Cu-13%Al-4%Ni-5%Y:

$$\text{Cu} = 40\text{g} * 0,78 = 31,2 \text{ g}$$

$$\text{Al} = 40\text{g} * 0,13 = 5,2 \text{ g}$$

$$\text{Ni} = 40\text{g} * 0,04 = 1,6 \text{ g}$$

$$\text{Y} = 40\text{g} * 0,05 = 2 \text{ g}$$

ANEXO B. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO BASADO EN LA NORMA ASTM-E112.

$$\log N = (n-1) \log 2$$

Donde:

N = número de granos por pulgada cuadrada.

N = tamaño de grano ASTM

$$\Rightarrow n = (\log N / \log 2) + 1$$

Aleación Cu-13%Al-4%Ni:

$$n = (\log (4) / \log (2)) + 1$$

$$n = 3$$

Aleación Cu-13%Al-4%Ni-1%Y:

$$n = (\log (15) / \log (2)) + 1$$

$$n = 5$$

Aleación Cu-13%Al-4%Ni-3%Y:

$$n = (\log (35) / \log (2)) + 1$$

$$n = 6$$

Aleación Cu-13%Al-4%Ni-5%Y:

$$n = (\log (60) / \log (2)) + 1$$

$$n = 7$$

ANEXO C. MICROGRAFÍA SEM CON ELECTRONES RETRODISPERSADOS A 6000X DE LOS NÓDULOS PRESENTES EN LA ALEACIÓN Cu-13%Al-4%Ni-1%Y.

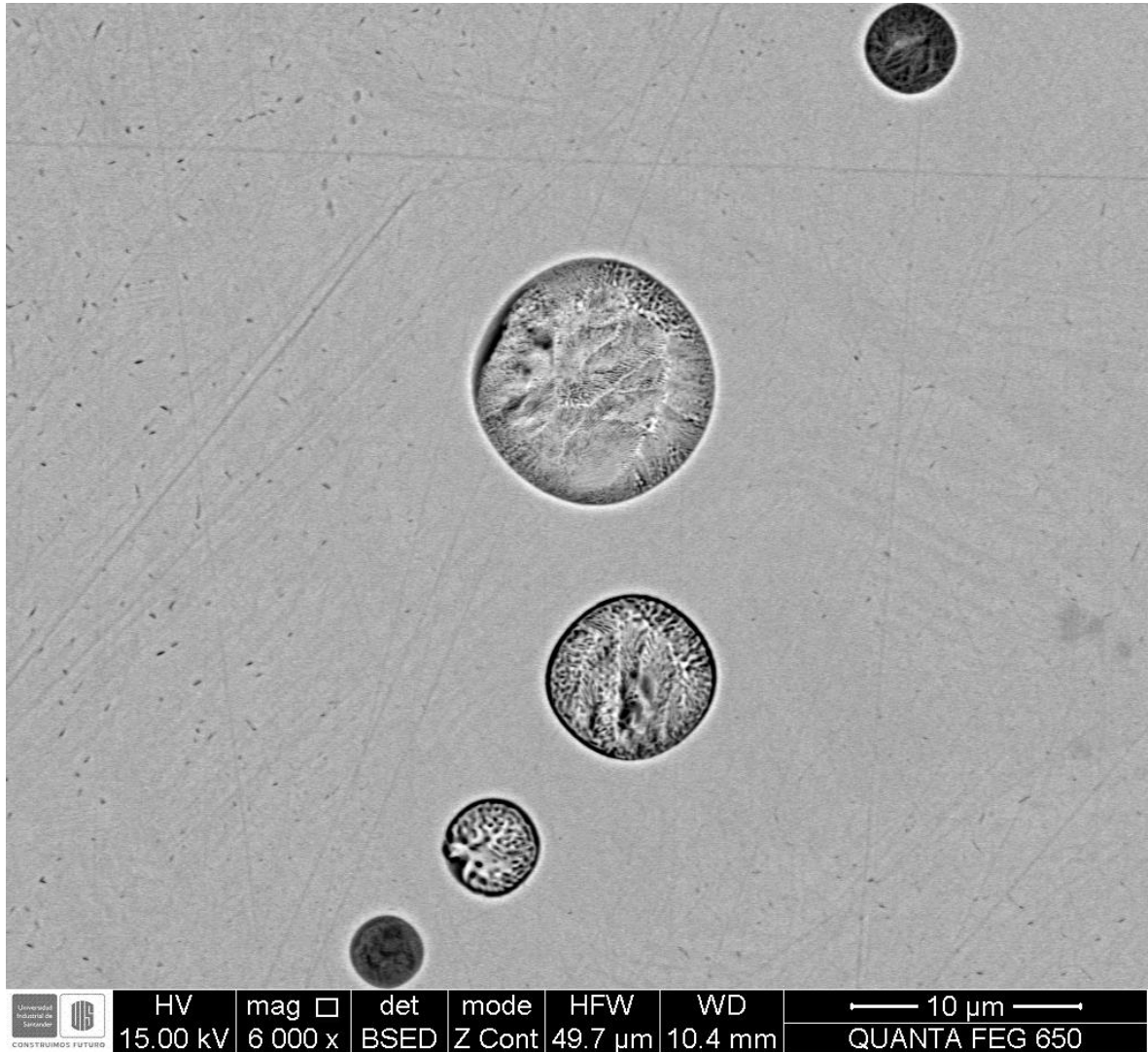


Figura 13. Micrografía a 6000x de nódulos presentes en la aleación Cu-14%Al-4%Ni-1%Y.

ANEXO D. RESULTADO DE LA PRUEBA EDS REALIZADA PARA LA FASE ENCONTRADA EN LA ALEACIÓN Cu-14%Al-4%Ni-5%Y.

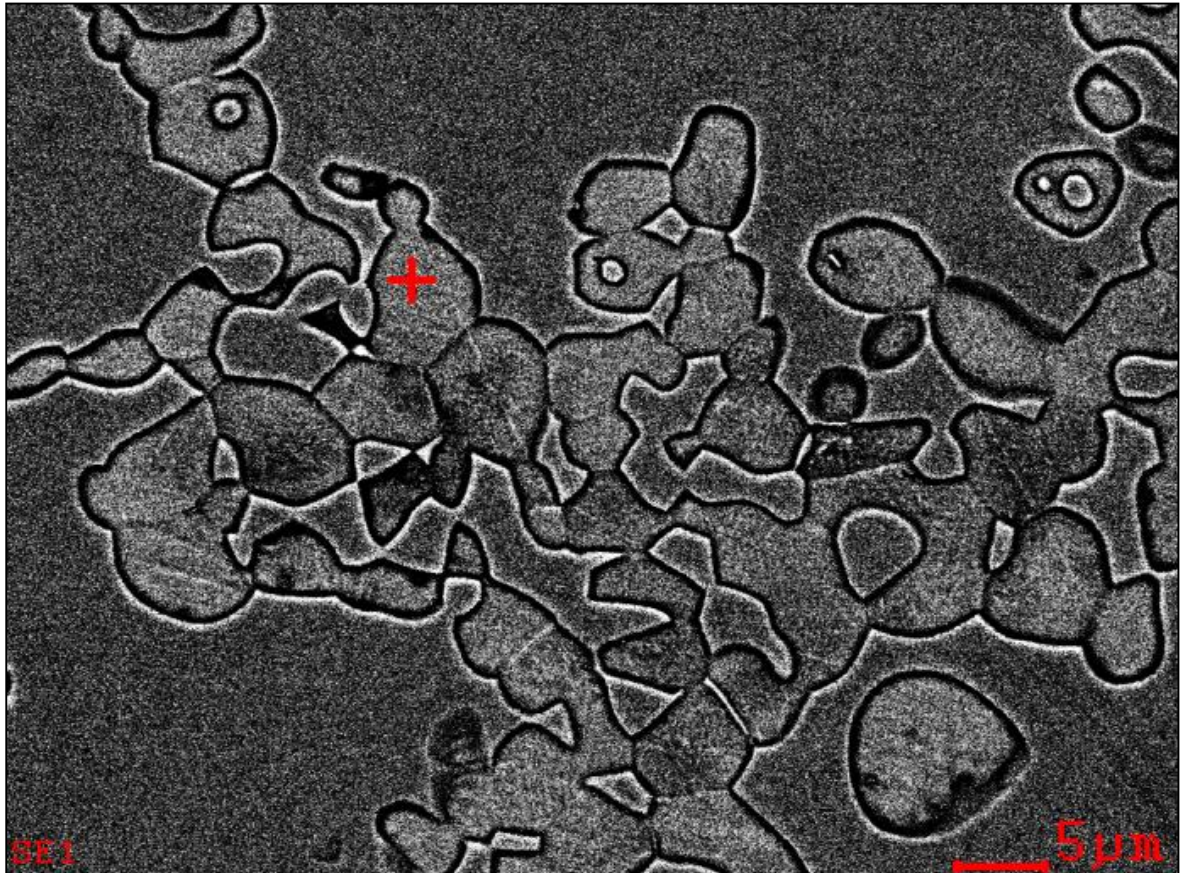


Figura 15. Zona de la fase donde se realizó el análisis químico elemental de la aleación Cu-14%Al-4%Ni-5%Y.

se evidencia la zona en la cuál se llevo a cabo el análisis químico elemental de la fase presente en la aleación Cu-14%Al-4%Ni-5%Y donde arrojó los resultados: Cu: 67,79 %, Al: 12,09%, Y: 20,11%. La fase que se analiza muestra altas cantidades de Itrio producidas por el cambio en la solubilidad del elemento en la solución a medida que se aumenta su porcentaje.

ANEXO E. CÁLCULO TIPO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRANSFERENCIA DE CARGA EN LA MUESTRA Cu-13%Al-4%Ni-1%Y MEDIANTE EL PROGRAMA EC-Lab V 10.19.

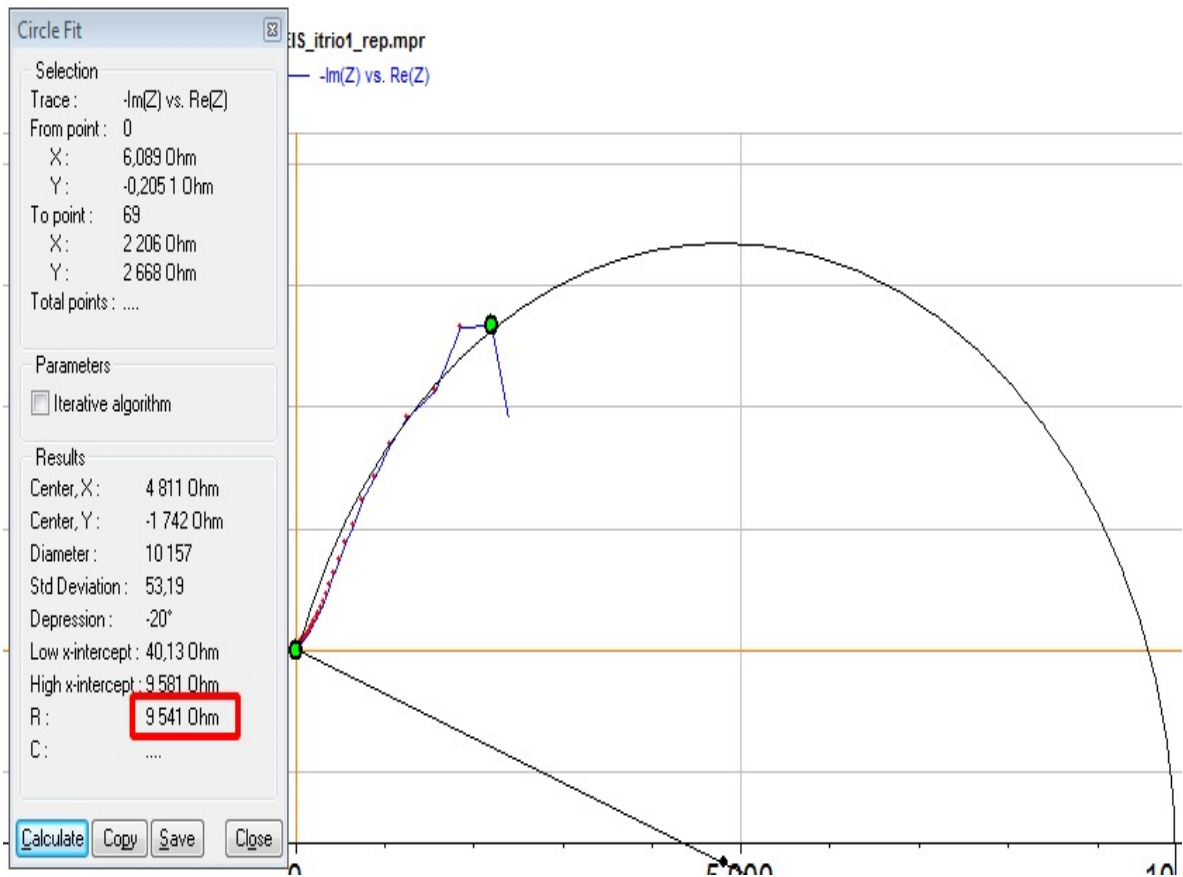


Figura 19. Cálculo de la R_{tc} mediante el método EIS en el programa EC-Lab.

ANEXO F. MICROGRAFÍA SEM CON ELECTRONES SECUNDARIOS A 20000X DE LOS NÓDULOS PRESENTES EN LA ALEACIÓN Cu-13%Al-4%Ni-1%Y.

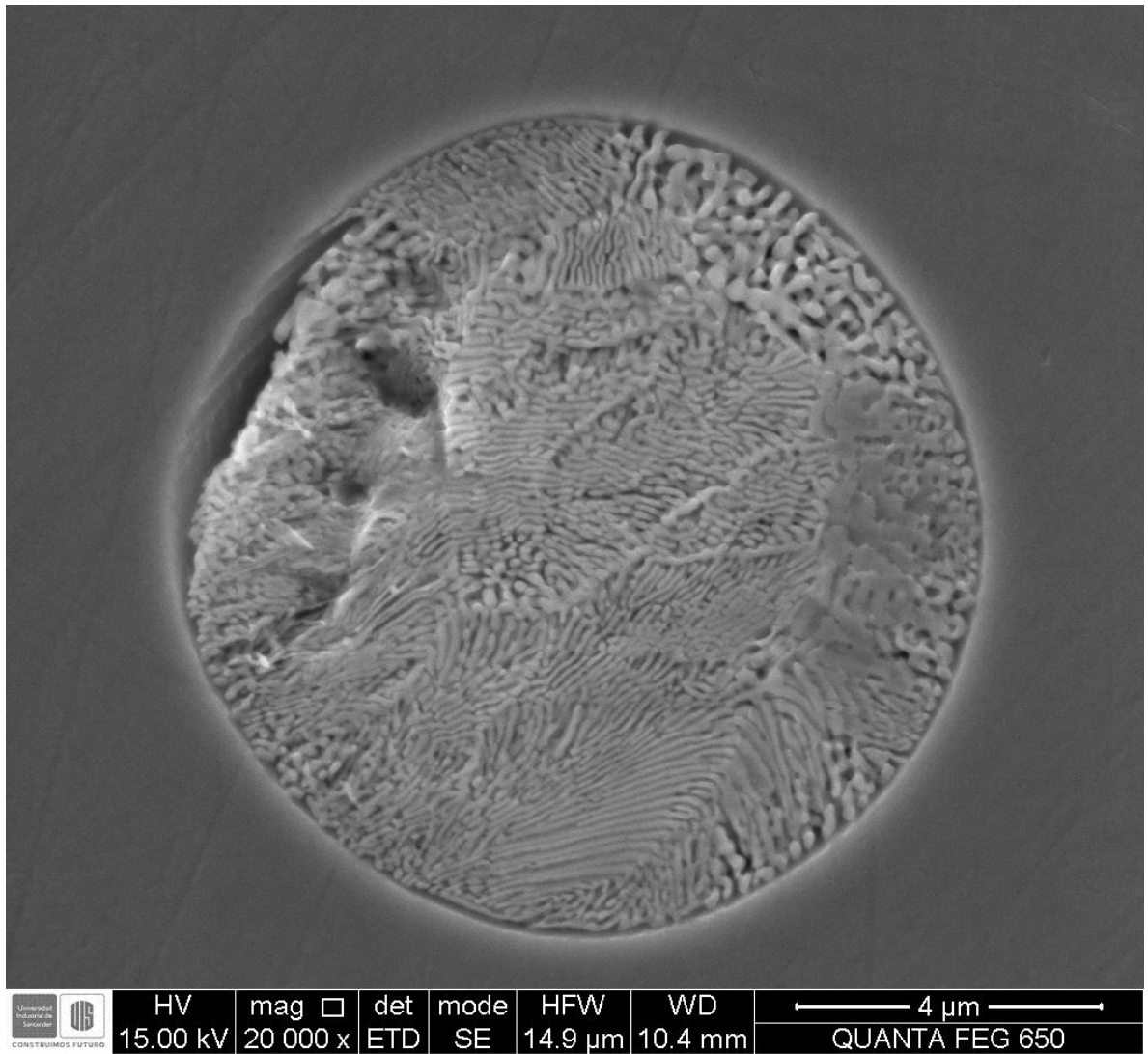


Figura 14. Micrografía a 20000x de nódulos presentes en la aleación Cu-14%Al-4%Ni-1%Y.

ANEXO G. DIAGRAMA DE FASES TERNARIO DE LA ALEACIÓN Cu-Al-Ni PARA DIFERENTES TEMPERATURAS.

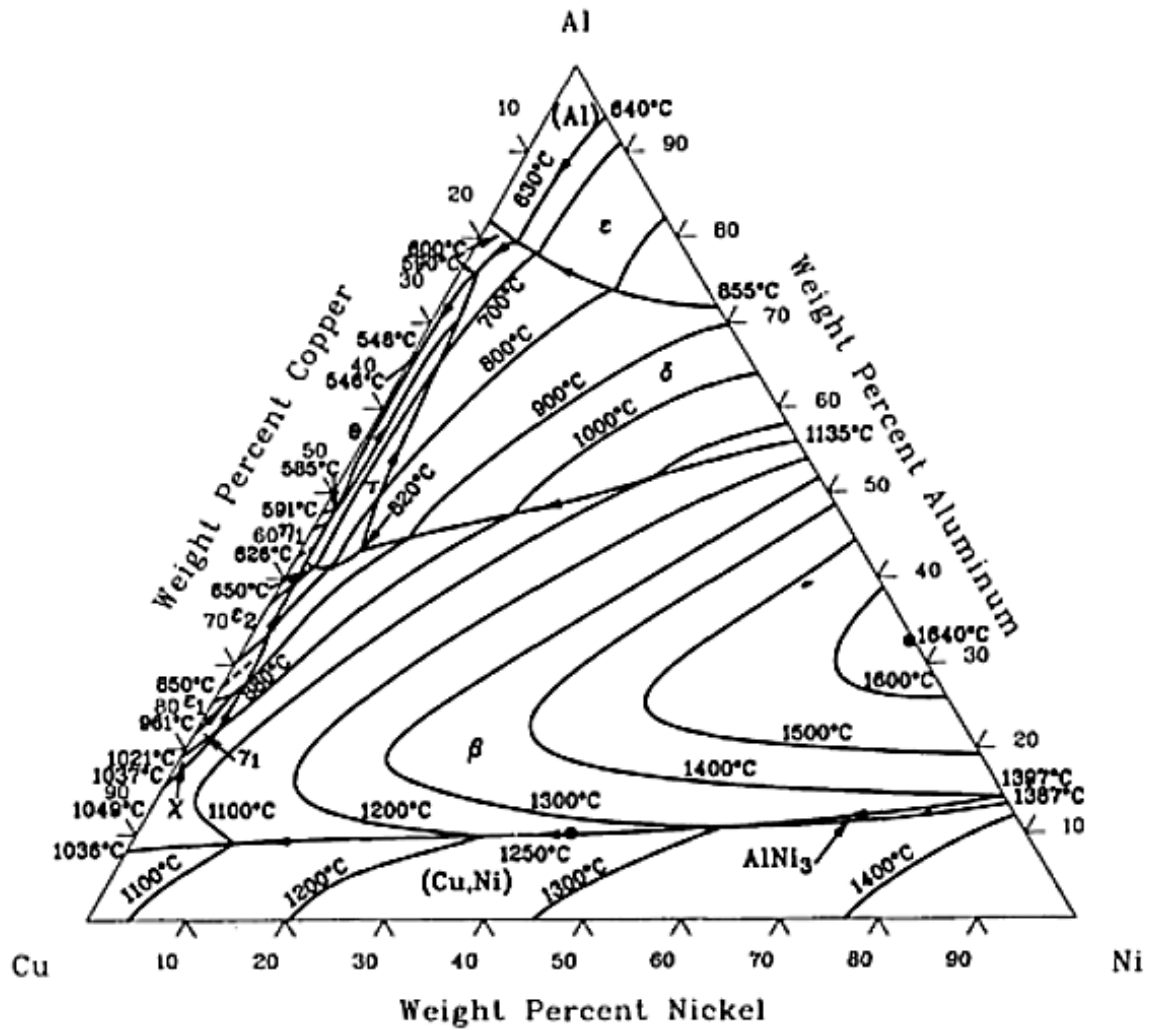


Figura 16. Diagrama de fases ternario de la aleación Cu-Al-Ni. [16]

ANEXO H. DIAGRAMA DE FASES TERNARIO DE LA ALEACIÓN Cu-Al-Ni
PARA UNA DE TEMPERATURA DE 900 °C.

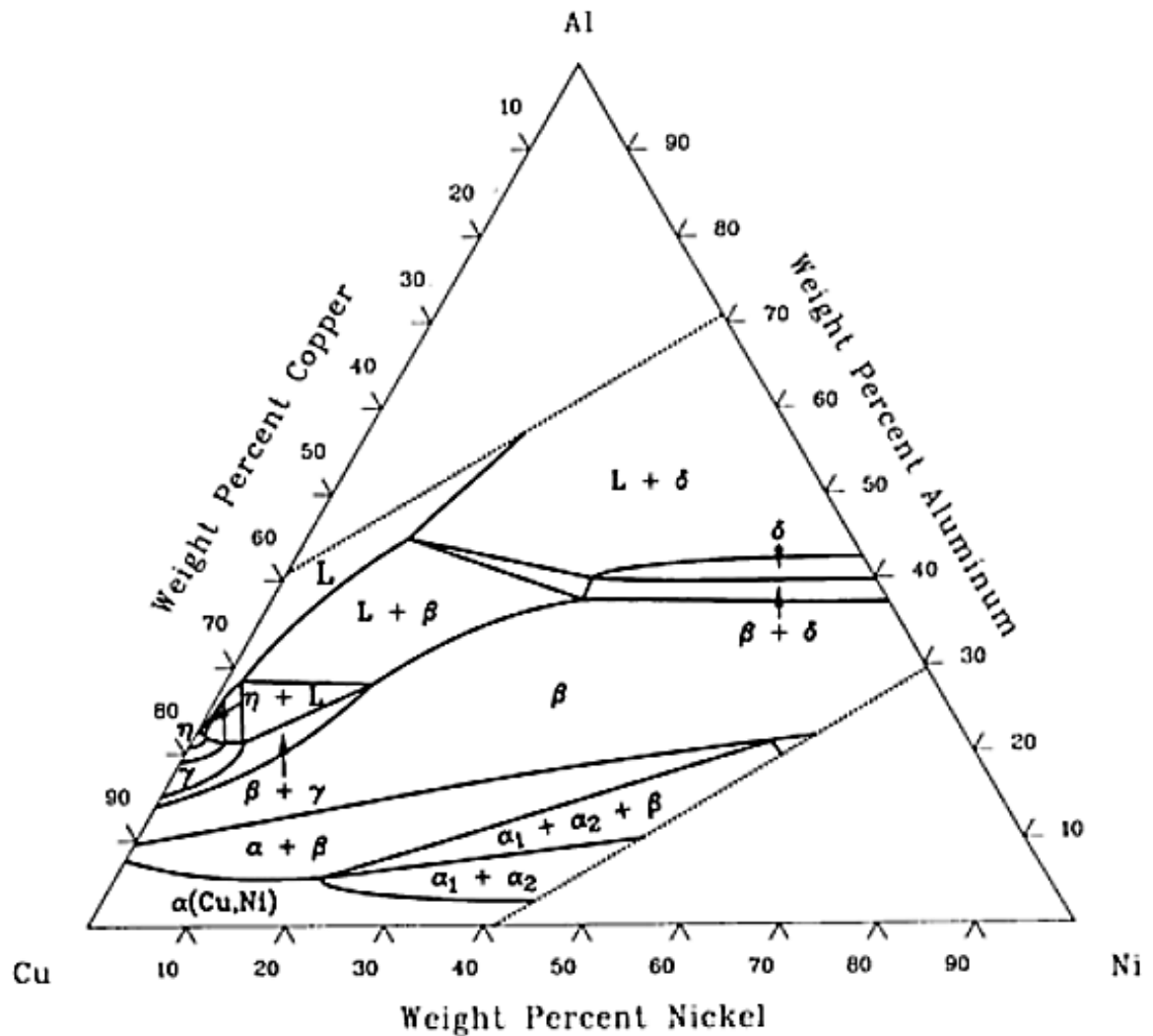


Figura 17. Diagrama de fases ternario de la aleación Cu-Al-Ni para una temperatura = 900 °C. [16]

ANEXO I. DIAGRAMA DE EQUILIBRIO PARA LAS ALEACIONES CU-AL Y CU-AL-NI CON 4% EN PESO DE NÍQUEL.

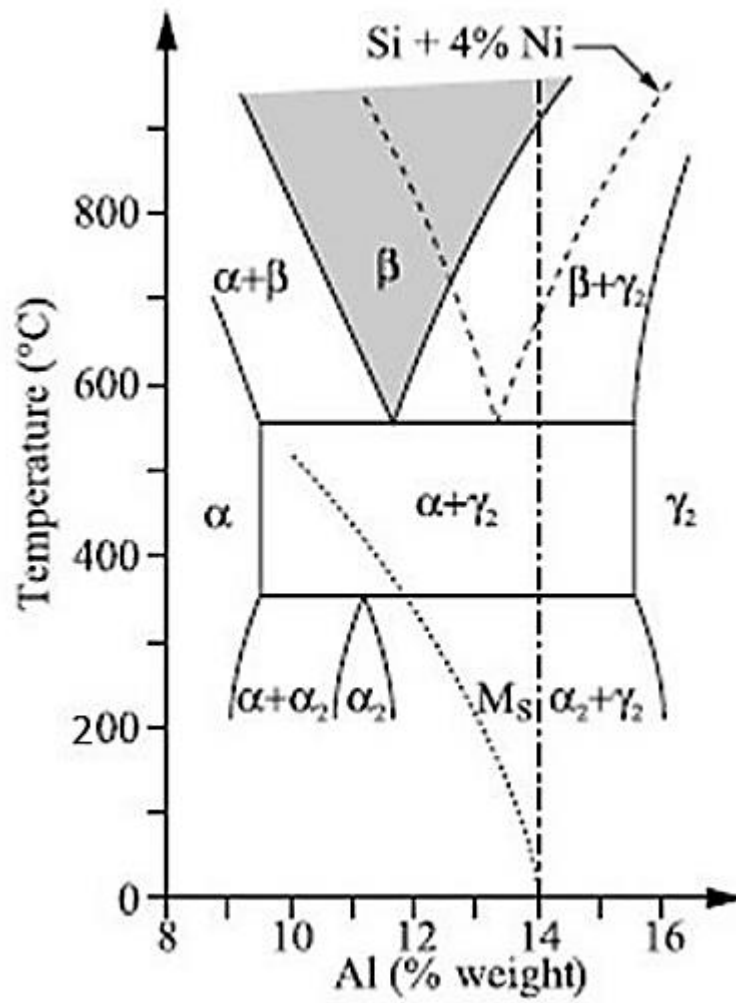


Figura 18. Diagrama de fases para la aleacion Al-Cu con 4 % de Ni. [19]