

Estudio de la microestructura, dureza y resistencia a la corrosión de una aleación Cu-Al-Ni-Y
con 0, 3, 5, y 7% de Itrio.

Anderson Faiber Jurado Ávila y Luis Carlos Marín García

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Andrés Giovanni González Hernández

Doctor en Ingeniería

Codirector

Mauricio Rincón Ortiz

Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria Anderson

No hay tesis que dure cien años, ni tesista que lo resista. Este proyecto es prueba de esfuerzo y perseverancia que no hubiera sido posible sin el apoyo económico y emocional de todas las personas que de una u otra manera contribuyeron a lo largo de este camino, En especial quiero agradecer.

A mi hijo Anderson Joel, por enseñarme lo que es el amor puro y sincero, por cada alegría que me ha dado desde el momento en que lo tuve en mis brazos, por darme cada día motivación y fuerzas para no decaer. Él es el pilar de mi vida, te amo infinitamente.

A mis amados padres Pedro Pablo Jurado y Avelaida Ávila Becerra, no hay palabras suficientes para expresar mi amor y gratitud por su fe, generosidad y enseñanzas inagotables a lo largo del camino. Gracias a ustedes he alcanzado otro peldaño en mi vida.

A mi Tía Martha Jurado, por su incondicional apoyo y paciencia en lo que fue mi carrera universitaria. Agradezco su compañía, bondad y comprensión en esos momentos difíciles.

A mi novia Saray Castro, gracias por ser mi confidente, mi amiga, mi apoyo incondicional y mi motivación para seguir adelante. Este trabajo también es para ella.

Con amor y alegría, Su Padre, hijo, sobrino y novio

Anderson Faiber Jurado Ávila

Dedicatoria Luis Carlos

Poder haber llegado a la posición de escribir el libro correspondiente al trabajo de grado, no es solo escribir un libro con un tema de una investigación hecha, no es solo un requisito para obtener un título profesional, es más que eso, es un símbolo; un símbolo del esfuerzo hecho, un símbolo que confirma la superación exitosa de retos y pruebas, un símbolo de perseverancia. Este símbolo es dedicado a aquellos que lo hicieron posible; Es dedicado a mis padres; Briceida García Martínez, Carlos julio Marin Pico, a mis hermanos y sobrina.

Ustedes de una y mil maneras hicieron lo difícil para que yo pudiera tener la posibilidad de materializar este símbolo en palabras y resultados, yo hice lo fácil, yo solo asistí a clases, rendí los parciales y redacte este libro, este logro es más de ustedes que mío.

Con amor, Su hijo, hermano y tío

Luis Carlos Marin García

Agradecimientos

Agradecemos a Dios, por permitirnos tener salud, paciencia, sabiduría y por su compañía para poder realizar con éxitos este proyecto a pesar de las dificultades y con ello cumplir uno de nuestros sueños que es ser Ingenieros Metalúrgicos de la UIS.

A los profesores Andrés Giovanni González Hernández, Mauricio Rincón Ortiz por su Confianza, Asesoría y disposición durante la realización de este trabajo de grado y por ende al grupo de investigación en desarrollo y tecnología de nuevos materiales-GIMAT.

A la Universidad Industrial de Santander, por permitirnos acceder a las diferentes bases de datos, por disponer las instalaciones y recursos, A los técnicos de laboratorio de procesos de fundición, Metalografía y tratamientos térmicos, Mario Navarrete, Laura Arenas, Cesar Ramos, Sergio González, Oscar Martínez, por enseñarnos a utilizar las instalaciones, los equipos de manera correcta y por su disposición en diferentes momentos del proyecto. A la Universidad Industrial de Santander-VIE, por financiar este trabajo de grado, a través del proyecto No. 2512, titulado “Evaluación de la microestructura, propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión de recubrimientos de Cr₂O₃ y Cr₂O₃-Al₂O₃ elaborados a partir de proyección térmica por combustión para aplicaciones en ambientes marinos.

A nuestra compañera, colega y amiga Ada Alejandra Rozo Murallas por su apoyo y asistencia en la preparación de tablas, ilustraciones y corrección del documento, siendo la piedra angular de este.

Anderson Faiber y Luis Carlos

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Marco teórico y revisión de antecedentes	17
2.1 Materiales Inteligentes (IM)	17
2.2 Aleaciones con memoria de Forma (SMA: Shape Memory Alloys).....	17
2.3 Transformación Martensítica	19
2.3.1 Martensítica: Vista Microscópica.	19
2.3.2 Martensítica: vista macroscópica.	22
2.4 Elementos con propiedades de memoria deforma (SM).....	24
2.5 SMA basados en Cobre.....	24
2.6 Antecedentes del itrio (Y) como aleante.....	25
3. Metodología	26
3.1. Obtención y preparación de la materia prima	26
3.2. Diseño de las aleaciones	26
3.3. Fabricación de las aleaciones diseñadas	27
3.4 Tratamiento térmico.....	28
3.5 Caracterización de las aleaciones.....	29
3.5.1 Caracterización química y microestructural	29
3.5.2 Ensayo de dureza	30
3.5.3 Resistencia a la corrosión.....	30

4. Resultados	32
4.1 Caracterización química y microestructural	32
4.1.1. Caracterización química y microestructural de la aleación Cu-13%Al-4%Ni	32
4.1.2. Caracterización química y microestructural de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-3%Y	33
4.1.3. Caracterización química y microestructural de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-5%Y	35
4.1.4. Caracterización química y microestructural de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-7%Y	37
4.2 Ensayo de dureza	38
4.3 Resistencia a la corrosión.....	39
4.3.1 Curvas de Polarización	39
4.3.2 Espectroscopia de impedancia electroquímica	43
5. Conclusiones	45
6. Recomendaciones	46
Referencias Bibliográficas	47
Apéndices.....	53

Lista de Tablas

Tabla 1. Composición química de las aleaciones estudiadas.....	27
Tabla 2. Dureza promedio de las aleaciones Cu-Al-Ni-xY caracterizadas.	39
Tabla 3. Resultados de prueba de corrosión realizadas en las aleaciones.	42
Tabla 4. Velocidad de corrosión en las aleaciones	42

Lista de Figuras

Figura 1. Descripción microscópica del proceso de memoria de forma.....	18
Figura 2. Esquema de la transformación de la estructura austenítica a la martensítica....	20
Figura 3. Mecanismos de acomodación de la transformación martensítica.	20
Figura 4. Fronteras de macla en la martensita desplazadas por la acción de una tensión cortante.....	21
Figura 5. Las relaciones de las fases y sus seis posibles transformaciones	22
Figura 6.Histéresis de la transformación en SMA	23
Figura 7. Presentación de la materia prima de la fabricación de las aleaciones.	26
Figura 8.Esquema representativo del Tratamiento Térmico.....	28
Figura 9. Etapas de la preparación metalográfica.	29
Figura 10. Microscopios utilizados en el análisis microestructural; la figura(a) microscopio óptico Olympus GX71, la figura (b) microscopio electrónico de barrido J.EOL-JSM6490 LV.....	30
Figura 11. Micrografías de la aleación Cu-13%Al-4%Ni por microscopia óptica (100X).	32
Figura 12. Zona de aplicación de analisis EDS con su espectro y composicion química para la aleación Cu-13%Al-4%Ni-3%Y.....	33
Figura 13. Micrografías de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-3%Y por microscopia óptica (1000X) y SEM (2000X).	34
Figura 14. Zona de aplicación de analisis EDS con su espectro y composicion química para la aleación Cu-13%Al-4%Ni-5%Y.....	35

Figura 15. Micrografías de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-5%Y por microscopía óptica (1000X) y SEM (2000X).	36
Figura 16. Zona de aplicación de análisis EDS con su espectro y composición química para la aleación Cu-13%Al-4%Ni-7%Y.....	37
Figura 17. Micrografías de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-7%Y por microscopía óptica (1000X) y SEM (2000X).	38
Figura 18. Curvas de Polarización de las diferentes aleaciones fabricadas	40
Figura 19. Diagramas de Bode para las aleaciones fabricadas con diferente porcentaje de Itrio.....	44

Lista de Apéndices

Apéndice A. Comparación del cambio de morfología del eutéctico debido al tratamiento térmico de temple, para cada una de las aleaciones con diferente porcentaje de Itrio.	53
Apéndice B. Determinación del número de tamaño de grano ASTM de las aleaciones por medio del procedimiento planímetro (o de Jeffries') (ASTM Standards, 2021)	54
Apéndice C. Determinación de la resistencia a la polarización según la norma ASTM G102	56
Apéndice D. Determinación de la velocidad de corrosión según la norma ASTM G59-97	57

Glosario

Aleación: unión de dos o más elementos, de los cuales uno debe ser un metal, para constituir un nuevo material que tenga las propiedades de sus componentes.

Austenita: fase madre o de alta temperatura.

Especular: en geometría, es una transformación respecto de un plano de simetría, en la que a cada punto de una figura se asocia a otro punto llamado imagen, la distancia de un punto y su imagen es la misma. Es decir, es como un objeto reflejado en un espejo.

Histéresis: es la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades aun sin la presencia del estímulo que la ha generado.

Impedancia: representa la cantidad de ohm con la cual se opone a la circulación de corriente.

Martensita: fase de baja temperatura.

Martensita maclada: este fenómeno ocurre cuando se deforma la martensita y predomina una sola orientación como resultado del maclado y el movimiento de ciertas intercaras.

Memoria de forma: si un objeto es deformado cuando se encuentra en condición martensítica y posteriormente regresa a su forma original por la acción de un estímulo, el material a partir del cual fue construido presenta un comportamiento conocido como efecto de memoria de forma.

Metalografía: es el estudio de la microestructura de todos los tipos de aleaciones metálicas.

Microestructura: estructura química, atómica y la distribución espacial de los constituyentes, inclusiones o fases en aleaciones metálicas.

Temple: tratamiento térmico que tiene por objetivo aumentar la dureza y resistencia mecánica del material, transformando toda la masa en Austenita con el calentamiento y después, por medio de un enfriamiento brusco se convierte en Martensita.

Resumen

Título: Estudio de la microestructura, dureza y resistencia a la corrosión de una aleación Cu-Al-Ni-Y con 0, 3, 5, y 7% de Itrio*

Autor: Jurado Ávila Anderson Faiber**
Marín García Luis Carlos

Palabras Clave: aleación Cu-Al-Ni, itrio, memoria de forma, propiedades mecánicas, impedancia electroquímica

Descripción: En la actualidad las distintas industrias se enfrentan a nuevos retos y exigencias que, para hacerles frente, se hace necesario dedicar esfuerzos y recursos a investigaciones de nuevos materiales como las aleaciones con memoria de forma como las aleaciones Cu-Al-Ni. Este proyecto estudia el efecto de la adición de diferentes contenidos de Itrio (3wt%, 5wt % y 7wt%) como microaleante en aleaciones Cu-13%Al-4%Ni. Se diseñaron y fabricaron aleaciones Cu-13%Al-4%Ni-xY, en un horno de inducción de inmersión en un crisol de grafito, con una atmosfera controlada de gas argón. Estas aleaciones se caracterizaron con análisis metalográficos por medio de microscopia óptica y electrónica, ensayos de dureza e impedancia electroquímica, de acuerdo a los resultados obtenidos, se observó que la microestructura y el efecto de memoria de forma eran sensibles a la adición de Itrio, observando un paso de la microestructura martensítica a dendrítica afectando la propiedad de memoria de forma, la adición de Itrio no solo afecta la propiedad de memoria de forma también mejora las propiedades mecánicas actuando como un refinador de grano observando que la dureza aumenta al aumentar el porcentaje de Itrio en la aleación pero a su vez disminuía la resistencia a la corrosión.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director

Abstract

Title: Study of the microstructure, hardness and resistance to corrosion of a Cu-Al-Ni-Y alloy with 0, 3, 5, and 7% Yttrium*

Author(s): Jurado Ávila Anderson Faiber**
Marín García Luis Carlos

Key Words: Cu-Al-Ni alloy, yttrium, shape memory, mechanical properties, electrochemical impedance

Description: Nowadays, the different industries are facing new challenges and demands that, in order to face them, it is necessary to dedicate efforts and resources to the research of new materials such as shape memory alloys like Cu-Al-Ni alloys. This project studies the effect of the addition of different contents of Itrium (3wt%, 5wt % and 7wt%) as microalloy in Cu-13%Al-4%Ni alloys. Cu-13%Al-4%Ni- xY alloys were designed and manufactured in an immersion induction furnace in a graphite crucible, with a controlled atmosphere of argon gas. These alloys were characterized with metallographic analysis by means of optical and electronic microscopy, hardness and electrochemical impedance tests, According to the results obtained, it was observed that the microstructure and the shape memory effect were sensitive to the addition of Itrium, observing a step from martensitic to dendritic microstructure affecting the shape memory property ,the addition of yttrium not only affects the shape memory property, it also improves the mechanical properties by acting as a grain refiner, observing that the hardness increases as the percentage of yttrium in the alloy increases, but at the same time the resistance decreases. to corrosion.

* Degree Project

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science.

Introducción

En las últimas décadas las diferentes industrias como la aeronáutica, electrónica, robótica, automotriz y biomédica, se han enfrentado a nuevas exigencias y retos en el desarrollo de sus actividades, que para satisfacerlas requieren de innovación y nuevas tecnologías indicando la necesidad de una mayor investigación de nuevos materiales y/o sus formas de fabricación. Uno de estos retos es el aumento de uso de sensores, actuadores y microcontroladores que por ejemplo en la industria automotriz se utilizan, pero no son los más óptimos en cuanto a peso, volumen y confiabilidad (Jani, Leary, Subic, & Gibson, 2014), esto significa un mayor consumo de combustible, aumentando los precios y disminuyendo así la posibilidad de ser atractivos para el comprador.

Un ejemplo de la innovación y aplicación de nuevos materiales; es el del uso de los llamados “materiales inteligentes” que permiten la miniaturización de microcontroladores integrados y software avanzado, lo que ha llevado a avances significativos en el campo de los sensores vehiculares y la electrónica de control, aumentando la demanda de las aleaciones con memoria de forma (SMA; Shape Memory Alloy) para aplicaciones técnicas y de ingeniería en diversos campos comerciales. El interés en estas aleaciones a nivel investigativo se debe a sus propiedades únicas y superiores como la superelasticidad, excelente amortiguación, memoria de forma y resistencia a la corrosión (SEAS .Estudios Superiores Abiertos S.A.U, 2016) y aunque existen diferentes elementos con estas propiedades, las aleaciones SMA basadas en Ni – Ti son las más explotadas comercialmente por sus propiedades y disponibilidad comercial pero tienen un costo muy elevado, por lo que encontrar una alternativa a esta aleación se hace necesario, como podrían ser las SMA basadas en Cu (Cu-Zn, Cu-Al, Cu-Zn-Al y Cu- Al Ni), que son de gran interés

debido a su propiedad de recuperación de forma, buena maquinabilidad y bajo coste de producción, sin embargo, sus aplicaciones siguen siendo limitadas debido a las deficiencias de estabilidad térmica, fragilidad y resistencia mecánica, estas desventajas se relacionan con su microestructura como el tamaño de grano, altas anisotropías elásticas y la congregación de fases secundarias o impurezas a lo largo de los límites de grano (Dasgupta, 2014), una manera de contrarrestar estas desventajas es la adición de un cuarto elemento al sistema (Metalvin Export).

Dentro de una revisión de antecedentes se han encontrado en investigaciones previas en las que se adicionaron elementos como el Mn, Ti, Hf, Gd, Bo, a aleaciones basadas en Cu y en Ni con el fin de refinar el grano y mejorar sus propiedades mecánicas como la memoria de forma (Zhang, y otros, 2019), también se han registrado buenos resultados en cuanto a la adición de elementos del grupo de tierras raras en aceros, Aun así, la investigación de elementos disponibles para las aleaciones con base de cobre es deficiente por esto se buscan microaleantes nuevos como el Itrio (Y), investigaciones demuestran que la adición de itrio en aleaciones permite reducir el tamaño de grano, aumentar la tenacidad de la aleación (Marin, 2019), y que incluso se obtiene un aumento en la dureza y mejora de la colabilidad de las aleaciones (Li, Wang, & Wei, 2010).

Por lo que, con este proyecto, se estableció una propuesta de investigación sobre el efecto de la adición de Itrio en aleaciones Cu-Al-Ni elaboradas por fundición con el fin de cambiar su microestructura, mejorar su dureza y validar la posibilidad de mejorar la resistencia a la corrosión de estas aleaciones gracias a la adición de Itrio. También se verificó que la aleación continuará teniendo su estructura martensítica y de esta manera asegurar que estas aleaciones siguieran conservando sus propiedades de memoria de forma.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Estudiar la microestructura, dureza y resistencia a la corrosión de una aleación Cu-Al-Ni-Y elaborada por fundición con una adición del 0, 3, 5 y 7% en peso de itrio.

1.2 Objetivos Específicos

Analizar el efecto de la adición de itrio (0, 3, 5 y 7% en peso) en la microestructura de las aleaciones Cu-Al-Ni elaboradas por fundición.

Estudiar la relación entre la microestructura y la dureza de las aleaciones elaboradas anteriormente.

Estudiar la relación entre la microestructura y la resistencia a la corrosión de las aleaciones de Cu-13%Al-4%Ni-Y con una adición del 0, 3, 5 y 7% en peso de itrio.

2. Marco teórico y revisión de antecedentes

2.1 Materiales Inteligentes (IM)

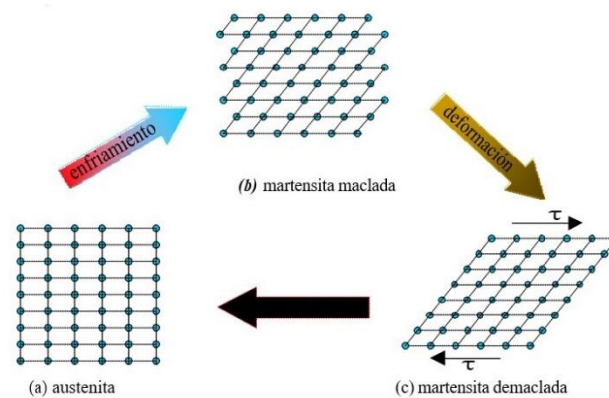
Son aquellos materiales que poseen ciertas funciones en sí mismos, (1) la función de detección (sensor), que detecta los estímulos del entorno o sus anomalías internas, (2) la función de procesamiento (procesador), que analiza la situación para llegar a una conclusión, y (3) la función de actuación (actuador en el propio sistema de material o estructura) (Takagi, 1996). Desde este punto de vista, la aleación con memoria de forma (SMA) tiene de forma intrínseca estas funciones mencionadas como: (1) sensor térmico o tensión, (2) un actuador por esfuerzo de recuperación durante la transformación de fase termo elástica y (3) fenómenos de memoria y recuperación, de modo que SMA puede tratarse como un "elemento material inteligente" (Furuya Y. , Intelligent Material Desing Using Shape Memory Alloy, 1994).

2.2 Aleaciones con memoria de Forma (SMA: Shape Memory Alloys)

Las SMA son un grupo de aleaciones metálicas que después de una deformación aparentemente plástica pueden volver a su forma original; ya sea en forma (efecto de memoria de forma) o tamaño (superelasticidad), gracias a un proceso de memorización entre dos fases de transformación; llamada transformación martensítica termo-elástica al que son sometidas estas aleaciones, que depende de la temperatura o del campo magnético. La función de estos materiales es simple, el material se puede deformar fácilmente aplicando una fuerza externa a bajas temperaturas (en su fase martensítica), estos materiales permanecerán deformados y se contraerá o recuperará su forma original cuando se caliente más allá de cierta temperatura ya sea por calentamiento externo o interno (calentamiento Joule); u otros estímulos relevantes como un campo magnético (MSMA) entonces volverán espontáneamente a su forma original que tenían

antes de la deformación. El principio para el efecto de memoria de forma es que estos materiales pueden transformarse desde y hacia la martensita fácilmente, hay muchas maneras por las cuales la martensita puede formarse a partir de la austenita, pero sólo por un “camino “para volver a la estructura austenítica. Este simple concepto es la base del Efecto de memoria de forma y se presenta esquemáticamente en la Figura 1; la austenita (a), es enfriada y se forma martensita maclada sin cambiar de forma (b), después se deforma moviendo las fronteras de maclado (c) al calentar tanto el estado (b) como el (c) se volverá a la estructura y forma original austenítica (De la Flor, 2005).

Figura 1. Descripción microscópica del proceso de memoria de forma.



Nota: Tomado de (De la Flor, 2005)

Las SMA tienen diferentes aplicaciones como en los productos de consumo y aplicaciones industriales (Ming H & L. McD, 2000), estructuras y compuestos (Furuya I. , 1996), automotriz (Dieter, 1990), aeroespacial (Hartl & Lagoudas, 2007), mini actuadores y sistemas micro electromecánicos (MEMS) (Sun L. , Huang, Ding, & Zhao, 2012), robótica (Furuya & Shimada, Shape memory actuators for robotic applications, 1991), biomédica (Petrini & Migliavacc, 2011) e incluso en moda (Van Langenhove & Hertleer, 2004).

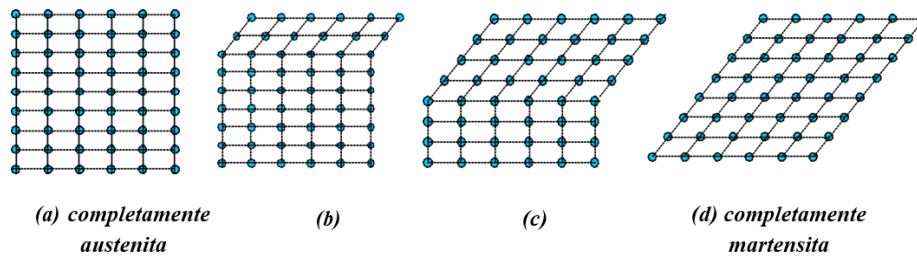
2.3 Transformación Martensítica

El comportamiento de memoria de forma es posible en estas aleaciones gracias a la facilidad que tienen estas de transformarse desde y hacia la martensita.

2.3.1 Martensítica: Vista Microscópica.

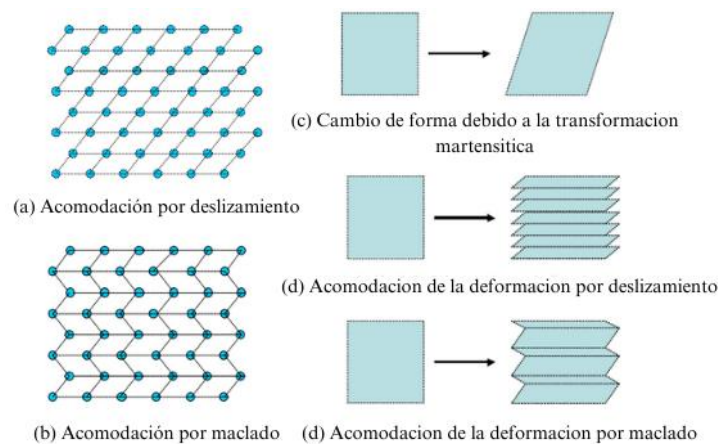
Las transformaciones de estado de los sólidos pueden ocurrir de dos maneras: por difusión y por desplazamiento (Chapman & Hall, 1998). En la transformación por difusión se forma una nueva fase debido a la reorganización aleatoria de átomos y presenta una composición química diferente que la matriz de la cual se originó, este tipo de transformación depende del tiempo y la temperatura. En las transformaciones por desplazamiento los átomos se reorganizan en nueva estructura más estable sin cambiar la composición química de la matriz y sin desplazarse grandes distancias, gracias a esto estas transformaciones no dependen del tiempo, pero sí de la temperatura (Gong, Wang, & Yang, 2006).

La transformación martensítica por lo general es una transformación por desplazamiento y se forma enfriando desde la fase madre o austenita. Ocurriendo de manera instantánea, liberando calor en su transformación y aumentando la presencia de martensita a medida que la temperatura disminuye, con una fracción de volumen independiente del tiempo y un rango de temperatura el en que coexisten austenita y martensita (Ping, Cui, & Yin, 2006). La transformación de austenita a martensita es un proceso complejo, pero puede describirse en dos etapas fundamentales; deformación de la red cristalina y cizalladura invariante de la red. “La primera parte, deformación de la red cristalina, consiste en todos los movimientos atómicos necesarios para producir la nueva estructura a partir de la antigua” (Wayman, 1992).

Figura 2. Esquema de la transformación de la estructura austenítica a la martensítica.

Nota: Tomado de (De la Flor, 2005)

En la Figura 2 se representa la estructura austenita (a) y la transformación progresiva hacia una estructura martensítica (b- d), Cada capa de átomos es desplazada una pequeña distancia, el resultado de esos pequeños movimientos coordinados es la nueva estructura martensítica. La segunda etapa de la transformación, cizalladura invariante de la red, es un paso de acomodación: la estructura martensítica resultante en la etapa anterior tiene una forma y un volumen diferente de la austenita circundante, por ende, la nueva fase y la austenita deben ser alteradas para adaptarse a la nueva estructura (Kim, 2006) y esto puede ocurrir por dos mecanismos : por deslizamiento (Figura 3a y Figura 3d) o por maclado (Figura 3b y Figura 3e).

Figura 3. Mecanismos de acomodación de la transformación martensítica.

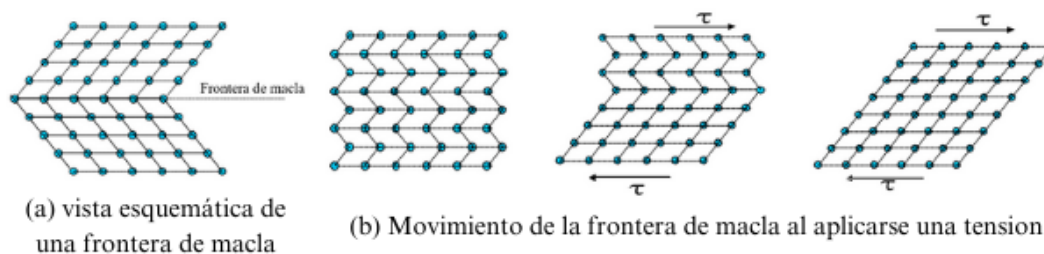
Nota : Tomado de (De la Flor, 2005)

En cualquiera de los dos mecanismos cada celda individual o paralelogramo, tiene la nueva estructura martensítica, pero la forma en conjunto es la de la austenita original. El maclado debe ser el proceso predominante para que el efecto de memoria de forma ocurra ya que es necesario que el arreglo sea reversible (Strandberg, 2006).

2.3.1.1 Maclado

La acomodación por el proceso de maclado tiene un papel importante en el efecto memoria de forma. La frontera del maclado es un plano especular: es decir los átomos en la frontera, ven el mismo número y tipo de enlaces en ambas direcciones (Figura 4a) estas fronteras tienen una energía muy baja y buena movilidad, por esto la estabilidad de la fase martensítica no se ve seriamente afectada por el número o localización de esas fronteras. La acomodación por deslizamiento requiere que se rompan los enlaces atómicos, mientras que en la por maclado permanecen intactos. Al aplicar una tensión las fronteras de maclado se mueven fácilmente (Figura 4b), produciendo una forma que se acomoda mejor a la tensión aplicada. El resultado de mover una frontera de maclado, es convertir una orientación en otra mejor orientada a la tensión aplicada. En el caso ideal, la condensación de muchas variantes de maclado en una única variante favorable se llama **demaclado**.

Figura 4. Fronteras de macla en la martensita desplazadas por la acción de una tensión cortante.



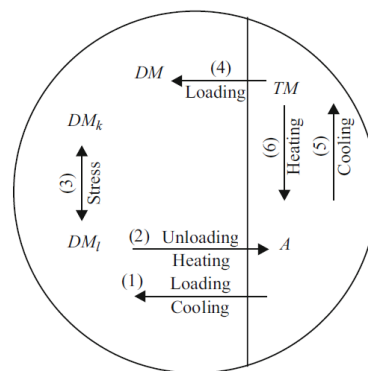
Nota: Tomado de (De la Flor, 2005)

2.3.2 Martensítica: vista macroscópica.

En las SMA pueden existir en dos fases diferentes con tres estructuras cristalinas diferentes (Austenita, martensita maclada, martensita demaclada) y seis transformaciones posibles (Jani, Leary, Subic, & Gibson, 2014) estas son : (1) la austenita se transforma en martensita demaclada tras la carga (A-DM), (2) la martensita demaclada experimenta una transformación inversa en austenita tras la descarga a una temperatura elevada, tras el calentamiento sin carga o con una carga muy baja (DM-A), (3) la martensita demaclada (variante k) se transforma en otra martensita demaclada (variante l) tras aplicación de carga ($DM_k - DM_l$), (4) la martensita demaclada se transforma en martensita maclada tras la aplicación de la carga (DM- TM), (5) la austenita se transforma en martensita maclada al enfriamiento (A -TM), (6) la martensita maclada se transforma en austenita al calentarse (TM- A). Los cambios en las estructuras reticulares anteriormente enunciados correspondientes a cada una de las transformaciones se presentan esquemáticamente en la Figura 5.

Figura 5. Las relaciones de las fases y sus seis posibles transformaciones

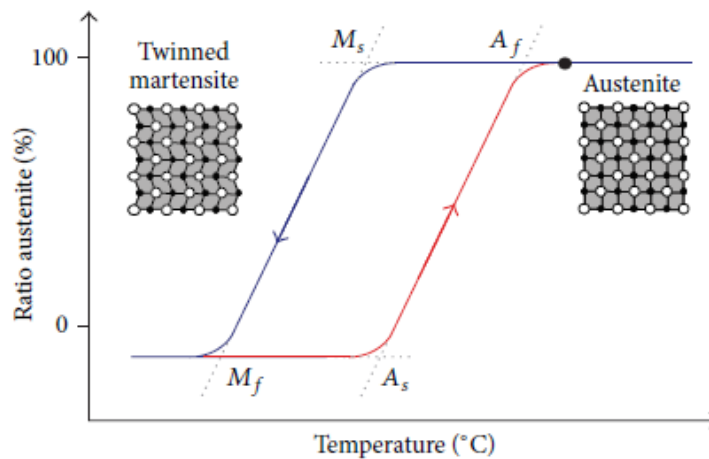
Las relaciones de las fases y sus seis posibles transformaciones



Nota: Tres fases y seis transformaciones: A-austenita; TM-martensita maclada; DM-martensita demaclada; los subíndices "l" y "k" se utilizan para las variantes de orientación de la martensita. Tomado de (Sun & Huang, 2009).

Las propiedades de la austenita y martensita son completamente diferentes, a medida que varía la temperatura se atraviesa un punto de transformación que genera cambios en las propiedades. Al iniciar el enfriamiento se empieza a formar martensita a la Temperatura (M_s) y termina a medida que decrece la temperatura a la Temperatura (M_f). La formación de la fase austenítica comienza a medida que la aleación es calentada y alcanza la temperatura (A_s) se genera una estructura cristalina cúbica centrada en las caras, rígida y dura que se termina de formar a (A_f). Cuando la aleación es calentada más allá de A_f , la deformación se recupera (efecto memoria de forma). El proceso de transformación de austenita a martensita y viceversa, siguen caminos diferentes debido a la histéresis de la transformación (Figura 6)

Figura 6. Histéresis de la transformación en SMA



Nota: Tomado de (Naresh, Bose, & Rao, 2016)

2.4 Elementos con propiedades de memoria de forma (SM)

Existen varios elementos cuyas aleaciones presentan memoria de forma (SM), como la plata-cadmio (Ag-Cd), el oro- cadmio (Au-Cd), el **cobre-aluminio-níquel (Cu-Al-Ni)**, el cobre-aluminio-manganeso (Cu-Al-Mn), el cobre- oro-zinc (Cu-Au-Zn), el cobre-estaño (Cu-Sn), el cobre-oro-estaño (Cu-Au-Sn), cobre-zinc (Cu-Zn), cobre- zinc-aluminio (Cu-Zn-Al), cobre-zinc-estaño (Cu-Zn-Sn), cobre-zinc-galio (Cu-Zn-Ga), cobre-zinc-silicio (Cu-Zn-Si), indio-titanio (In-Ti), níquel-aluminio (Ni-Al), níquel- titanio (Ni-Ti), hierro-platino (Fe-Pt), hierro-paladio (Fe-Pd), etc. (Dasgupta, 2014). De las aleaciones mencionadas anteriormente, las aleaciones basadas en Ni-Ti son las más explotadas comercialmente por sus propiedades SM, éstas tienen una amplia disponibilidad comercial y son utilizadas principalmente para aplicaciones biomédicas debido a su buena biocompatibilidad y resistencia a la corrosión. En otras aplicaciones, como actuadores funcionales y sensores, las SMA basados en cobre son una excelente alternativa a las aleaciones basadas en Ni-Ti debido a su bajo coste.

2.5 SMA basados en Cobre

Las SMA basados en Cu están en investigación desde hace ya varios años, pero su disponibilidad comercial es escasa en todo el mundo, las aleaciones basadas en Cobre ya sean binarias o ternarias (Cu-Zn, Cu-Al, Cu-Zn-Al y Cu- Al Ni) son de gran interés debido a su propiedad de recuperación de forma, facilidad (buena maquinabilidad) y bajo coste de producción además de excelente conductividad térmica y eléctrica, incluso algunas de ellas tienen un comportamiento similar al caucho después del envejecimiento en un estado martensítico. Sin embargo, sus aplicaciones siguen siendo limitadas debido a las deficiencias de estabilidad térmica, fragilidad y resistencia mecánica, que están estrechamente relacionadas con las características

microestructurales como el tamaño de grano grueso, altas anisotropías elásticas y la congregación de fases secundarias o impurezas a lo largo de los límites de grano (Dasgupta, 2014).

2.6 Antecedentes del itrio (Y) como aleante.

Dentro de las RE se encuentra el Itrio, la adición de itrio (Y) como elemento de microaleación en aleaciones permite reducir el tamaño de grano, aumentar la tenacidad de la aleación (Marin, 2019), Arias Navarro & González Muñoz (2019) afirman que también se obtiene un aumento en la dureza de la aleación. Por otro lado, la corrosión es muy importante en estos materiales a base de Cobre debido a que van a estar sometidos a ambientes corrosivos como lo son en el caso de actuadores y válvulas. Según estudios, al adicionar un cuarto aleante que refine el tamaño de grano en las aleaciones de forma con base de cobre usadas en este tipo de aplicaciones, es posible que se genere un incremento en la corrosión (Adnan, Abbass, & Jomaa, 2021). Resultados de las referencias (Guo, Wang, & Chen, 2019) y (Pozdniakov & Barkov, Microstructure and materials characterisation of the novel Al–Cu–Y alloy, 2018) demostraron que la adición de Y en aleaciones de Al-Cu exhibe una alta estabilidad térmica por la formación de fases ricas en Y, la adición de trazas de Y refina el tamaño de grano y reduce el rango de temperatura de solidificación, de modo que la microestructura y la colabilidad de las aleaciones (Li, Wang, & Wei, 2010), (Pozdniakov & Yu, Microstructure, mechanical properties and superplasticity of the Al–Cu–Y–Zr alloy, 2019), (Li, Wang, & Wei, 2009). El estudio de Guo et al. sugiere que la adición de Y (0.1–0.3%) aumenta la tenacidad a la fractura de las aleaciones Al-Cu-Mn en diferentes grados. Por lo tanto, se puede ver que agregar la cantidad adecuada de Y a las aleaciones tiene una amplia perspectiva de investigación.

3. Metodología

Para llevar a cabo el proyecto se definió la metodología en 5 etapas que son: obtención y preparación de la materia prima, diseño de las aleaciones, fabricación de las aleaciones diseñadas, tratamiento térmico y caracterización de las aleaciones, a continuación, se detallan cada una de estas etapas:

3.1. Obtención y preparación de la materia prima

La materia prima necesaria para la fabricación de las aleaciones es cobre, aluminio, níquel e itrio, debido a que se trata de una aleación con memoria de forma cuya base es Cu-Al-Ni y el elemento aleante en estudio es el Itrio. Teniendo en cuenta lo anterior, se obtiene esta materia prima en diferentes presentaciones como esferas, lingotes, polvo y material granulado como se muestra en la Figura 7, todos ellos con un grado de pureza del 99%.

Figura 7. Presentación de la materia prima de la fabricación de las aleaciones.



3.2. Diseño de las aleaciones

Se diseñaron las 4 aleaciones enumeradas en Tabla 1 partiendo de una aleación Cu-Al-Ni sin Itrio e ir aumentando en porcentajes el contenido de Itrio buscando evaluar el efecto de este aleante en la aleación.

Tabla 1. Composición química de las aleaciones estudiadas

#Aleación	Composición	Y (itrio)% en peso
1	Cu-13%Al-4%Ni-xY	x=0%
2	Cu-13%Al-4%Ni-xY	x=3%
3	Cu-13%Al-4%Ni-xY	x=5%
4	Cu-13%Al-4%Ni-xY	x=7%

3.3. Fabricación de las aleaciones diseñadas

En esta etapa se hizo uso del horno perteneciente al laboratorio de microfundición del grupo de investigación GIMAT que corresponde a un horno de inducción Pressovac de la marca ASEG GALLONI, este cuenta con una bomba de gas para la cámara de vacío y otra bomba de agua para la refrigeración de la bobina. Además, cuenta con un pirómetro óptico que alcanza los 2100 °C. Este horno es de baja frecuencia, pero tiene una potencia de 75 Kw y se encuentra conectado a un cilindro de argón que se utilizó como gas protector de la aleación.

Durante la preparación de cada carga, se precalentó el horno hasta los 200 °C junto con el crisol, esto tarda aproximadamente 5 minutos. Teniendo la carga lista y el horno precalentado, se introdujo la materia prima dentro del crisol, y se siguieron los pasos enunciados a continuación para el correcto uso del horno:

- Se indicó por medio del SET POINT la temperatura de colada, esto depende de la aleación seleccionada, en nuestro caso fue de 1800 °C.
- Aseguramos de manera visual el sellado de la cámara de vacío al momento de cerrar la compuerta del horno, esta se activa automáticamente al tener la conexión con el gas de protección.
- Se inició con una potencia del horno correspondiente a 75% y se elevaba la potencia del horno progresivamente hasta una potencia del 90% durante 4:30 minutos, hasta alcanzar la temperatura de fusión.

- Se abrió el horno cuando la aleación se encontraba totalmente fundida, y se dejó solidificar la aleación dentro del crisol hasta enfriar.

Por último, se volvía a repetir el proceso de fundición, con la finalidad de garantizar una correcta homogeneización de la aleación.

3.4 Tratamiento térmico

Teniendo las aleaciones con la composición química deseada, se procedió a realizar el tratamiento térmico de temple en un horno tipo mufla que pertenece al laboratorio de tratamientos térmicos de la facultad. Este horno fue precalentado durante aproximadamente dos horas hasta alcanzar una temperatura de 900°C antes de introducir las muestras. El tratamiento térmico del temple realizado a las muestras, consistía en introducir las muestras en el horno a 900°C, esperar una homogeneización de temperaturas entre el horno y las muestras, sostener durante 2 horas a esta temperatura, como se indica en la Figura 8 y finalmente al sacar las muestras someterlas a un enfriamiento con agua fría inmediatamente, buscando con esto obtener una microestructura martensítica en las aleaciones.

Figura 8.Esquema representativo del Tratamiento Térmico



3.5 Caracterización de las aleaciones

Se hicieron diferentes pruebas de caracterización para verificar que la aleación tuviera una estructura martensítica y comprobar el afinamiento del grano. Se realizó un análisis metalográfico para ver la microestructura y para validar la composición química de las aleaciones se realizó un estudio EDS en el microscopio electrónico de barrido. También se hicieron pruebas de dureza esperando un aumento de esta propiedad en función de la adición del Itrio. Adicionalmente, por medio de la prueba de impedancia, se validó que existiera un aumento en la resistencia a la corrosión. Los ensayos realizados para caracterizar las aleaciones se describen a continuación:

3.5.1 Caracterización química y microestructural

Para un correcto análisis microestructural, primero se realizó una preparación de las muestras siguiendo el procedimiento mostrado en Figura 9 basado en la norma ASTM E3 – 11. (ASTM Standards, 2017).

Figura 9. Etapas de la preparación metalográfica.



Con las muestras preparadas, se procedió a observar las microestructuras correspondientes a cada una de ellas, esto se hizo por medio del microscopio óptico OLYMPUS GX 71 mostrado en la Figura 10a y posteriormente se sometieron a un análisis en el microscopio electrónico de barrido (termoiónico) JEOL-JSM 6490LV perteneciente al laboratorio MEB de la Sede de Investigación Universitaria–SIU de la universidad de Antioquia, mostrado en la Figura 10b.

Figura 10. Microscopios utilizados en el análisis microestructural; la figura(a) microscopio óptico Olympus GX71, la figura (b) microscopio electrónico de barrido J.EOL-JSM6490 LV



3.5.2 Ensayo de dureza

Las probetas fueron sometidas a 6 mediciones como parte del ensayo de dureza, en el que se utilizó un indentador de pirámide de diamante con una precarga de 60 kilogramos, buscando generar una deformación plástica permanente para poder realizar el análisis como lo indica la norma ASTM E18 – 22. (ASTM Standards , 2022).

3.5.3 Resistencia a la corrosión

La evaluación del efecto del Itrio en la resistencia a la corrosión se analizó por medio de tres técnicas: Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS, del inglés Electrochemical Impedance Spectroscopy), Curvas de polarización con extrapolación de pendientes Tafel y Resistencia de Polarización Lineal (LPR, del inglés Linear Polarization Resistance). Se utilizó un potencióstato GAMRY perteneciente al grupo de investigación GIMAT, para el ensayo de espectroscopia de impedancia electroquímica. Para la realización de la prueba se unió por medio de cinta metálica se adhirió el cable AWG #22 a la muestra y luego las muestras fueron montadas

en resina epóxica y desbastadas hasta una granulometría de lija 600. Posteriormente, se preparó una solución de NaCl 3,5 % en peso y para ello se depositaron 35g de NaCl en 1000 ml de agua desionizada y se agitó a 600 rpm durante aproximadamente 38 minutos hasta obtener una solución homogénea. La celda electroquímica estudiada estaba compuesta por un electrodo de trabajo correspondiente a cada una de las aleaciones fabricadas, un electrodo de referencia de calomel saturado (SCE), un contra electrodo de platino y un electrolito acuoso de NaCl al 3,5% en peso conectado, la cual estaba conectada a el potencióstato GAMRY.

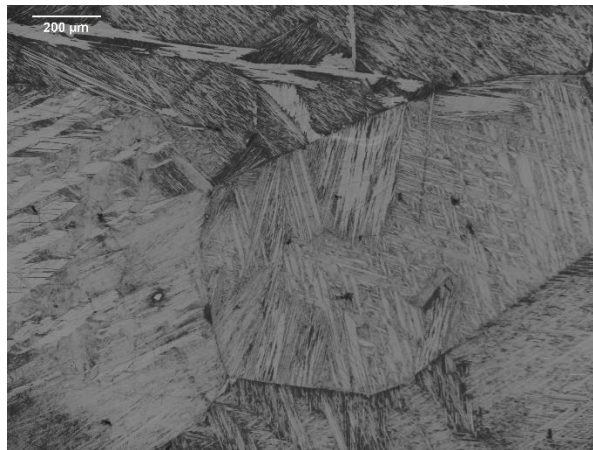
4. Resultados

Los ensayos de caracterización de las aleaciones fabricadas fueron 6; El análisis metalográfico se realizó utilizando un microscopio óptico y un microscopio electrónico de barrido MEB y MEB-EDS para determinar la composición química de las aleaciones. Para determinar las propiedades mecánicas de las aleaciones se realizó el ensayo dureza y la resistencia a la corrosión se analizó por medio de tres técnicas: Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS, del inglés Electrochemical Impedance Spectroscopy), Curvas de polarización con extrapolación de pendientes Tafel y Resistencia de Polarización Lineal (LPR, del inglés Linear Polarization Resistance).

4.1 Caracterización química y microestructural

4.1.1. Caracterización química y microestructural de la aleación Cu-13%Al-4%Ni

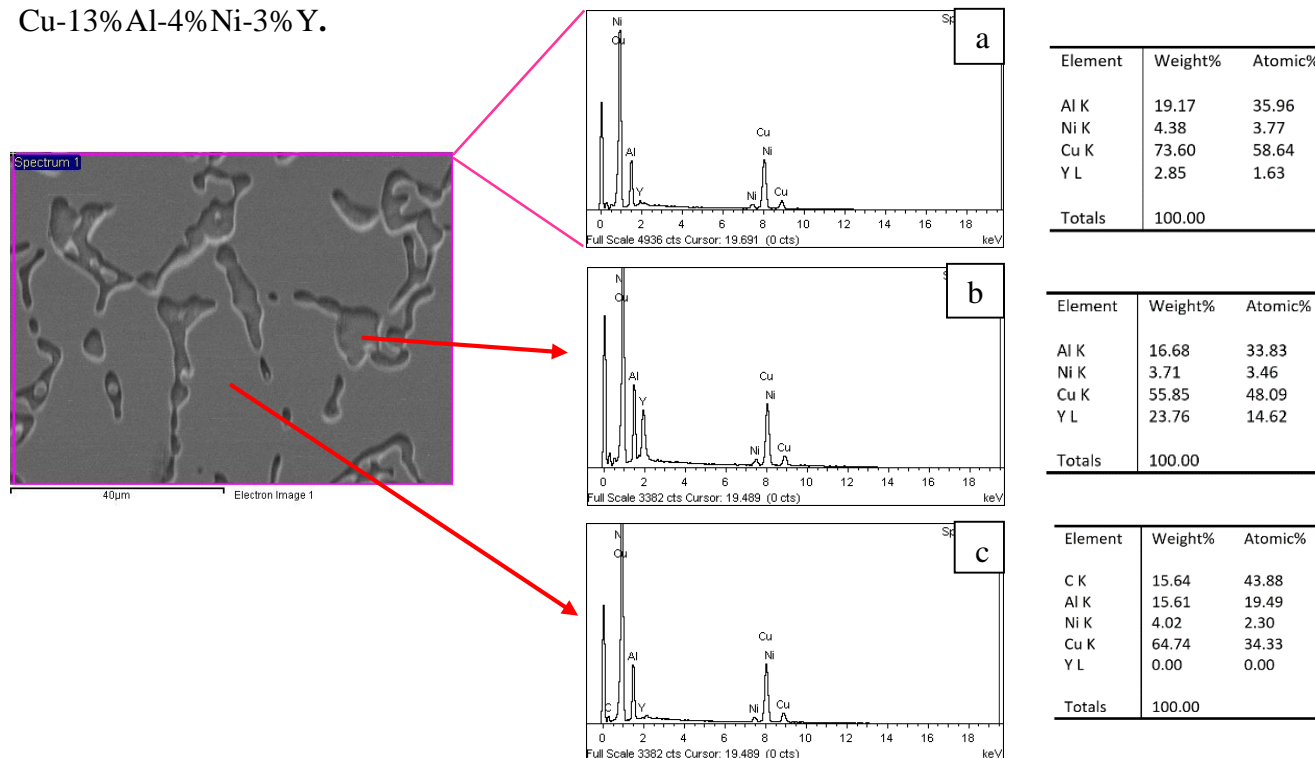
Figura 11. Micrografías de la aleación Cu-13%Al-4%Ni por microscopia óptica (100X).



La Figura 11 muestra una micrografía de la aleación Cu-13%Al-4%Ni en la cual observa una microestructura martensítica, con un tamaño de grano ASTM 3 que fue determinado según la norma ASTM E 91.

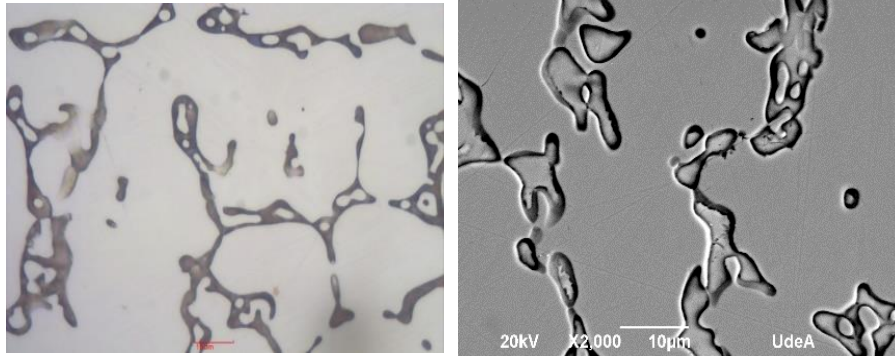
4.1.2. Caracterización química y microestructural de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-3%Y

Figura 12. Zona de aplicación de análisis EDS con su espectro y composición química para la aleación Cu-13%Al-4%Ni-3%Y.



La Figura 12 presenta el diagrama de espectros de los elementos químicos de distintas zonas de la aleación y su correspondiente composición química. En la Figura 12(a) se presenta el espectro y composición de la zona generalizada en la cual se observa que el contenido de itrio es de 2.85% wt que es un valor cercano al planteado inicialmente en el diseño de la aleación (3% wt), en la Figura 12(b) se presenta la toma EDS en los límites de granos en el cual se observa que el itrio precipitado en estas zonas (límites de las dendritas) con un porcentaje de 23,76% wt. En la Figura 12(c) la toma EDS se realizó dentro del grano de la fase presente, el resultado obtenido muestra que dentro de los granos no hay itrio.

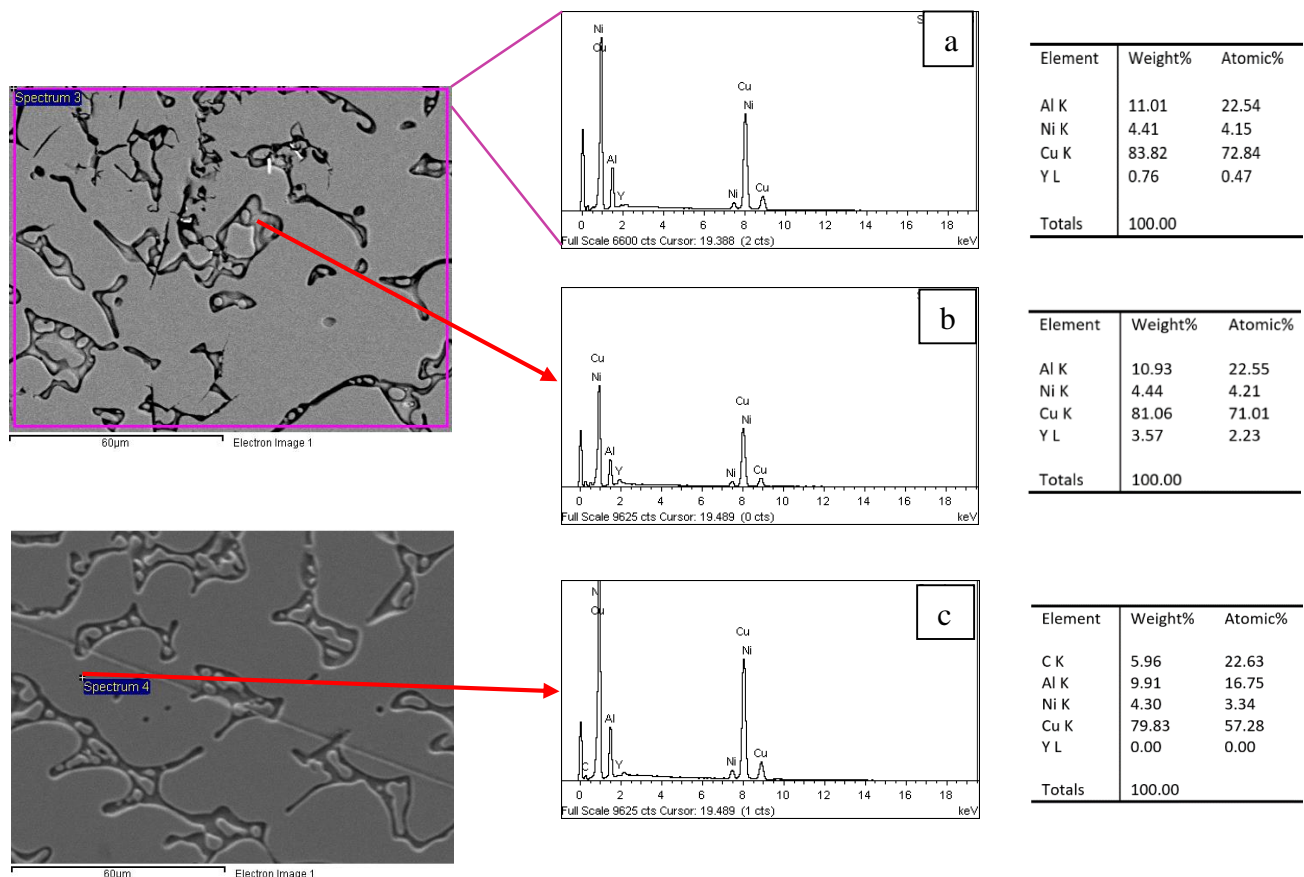
Figura 13. Micrografías de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-3%Y por microscopia óptica (1000X) y SEM (2000X).



La Figura 13 correspondientes a las micrografías de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-3%Y se observa una estructura dendrítica correspondiente a granos de cobre, níquel y aluminio de color blanco y el itrio en los límites de grano de color oscuro. Además, un eutéctico se presenta en los límites grano con una morfología diferente que cambia después del tratamiento térmico (Apéndice A), con tamaño de grano #6 calculado según la norma ASTM E 91.

4.1.3. Caracterización química y microestructural de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-5%Y

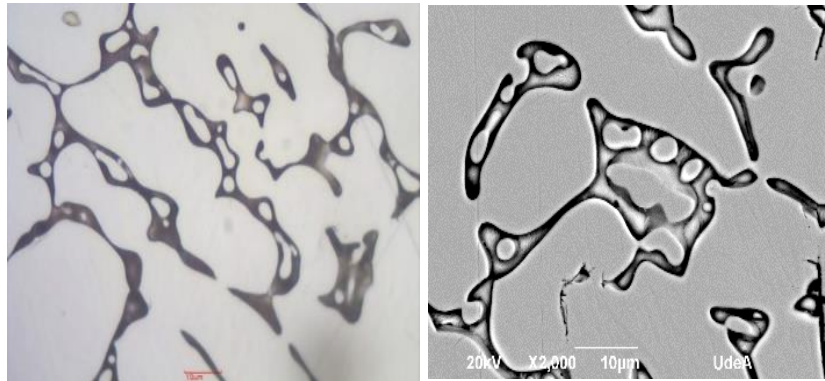
Figura 14. Zona de aplicación de análisis EDS con su espectro y composición química para la aleación Cu-13%Al-4%Ni-5%Y.



En la Figura 14 se presenta el diagrama de espectro de los elementos químicos de distintas zonas de la aleación y su correspondiente composición química. En la Figura 14(a) se presenta el espectro y composición de la zona generalizada, en la cual se observa que el contenido del itrio es muy bajo respecto al valor planteado inicialmente en el diseño de la aleación (5%wt) el valor encontrado fue de 0.76% wt. En las aleaciones aquí estudiadas con un porcentaje mayor al 3% fue difícil encontrar zonas que presentaran el valor de itrio esperado o planteado en el diseño de las aleaciones, se presume un par de hipótesis de la ausencia del itrio ; (1) la posible oxidación del

itrio ya que cuando se realizaron las aleaciones se generaron vapores blanquecinos en el horno de induccion, (2) despredimientos de la fase en la preparacion metalografica excesivamente fuerte debido a la morfologia hueca que se observó en las micrografias SEM. En la Figura 14(b) se presenta la composicion quimica en los limites de granos y nuevamente se observa que el itrio precipitó en estas zonas con un porcentaje de 3,6% wt. En la Figura 14(c) se hizo la toma dentro de un grano, nuevamente se observa que no hay itrio, este fue el mayor porcentaje del par de zonas analizadas de la aleacion.

Figura 15. Micrografías de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-5%Y por microscopia óptica (1000X) y SEM (2000X).



La Figura 15 correspondientes a las micrografías de la aleación Cu-13%Al -4%Ni-5%Y se observa una estructura dendrítica correspondiente a granos de cobre, níquel y aluminio de color blanco, y el itrio en los límites de grano de color oscuro. El eutéctico presente en los límites de grano cambió su morfología después del tratamiento térmico (Apéndice A), para la aleación de 5% wt de Y el tamaño de grano es de 7, calculada a partir de la norma ASTM E91 (ASTM Standards, 2021).

4.1.4. Caracterización química y microestructural de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-7%Y

Figura 16. Zona de aplicación de análisis EDS con su espectro y composición química para la aleación

Cu-13%Al-4%Ni-7%Y.

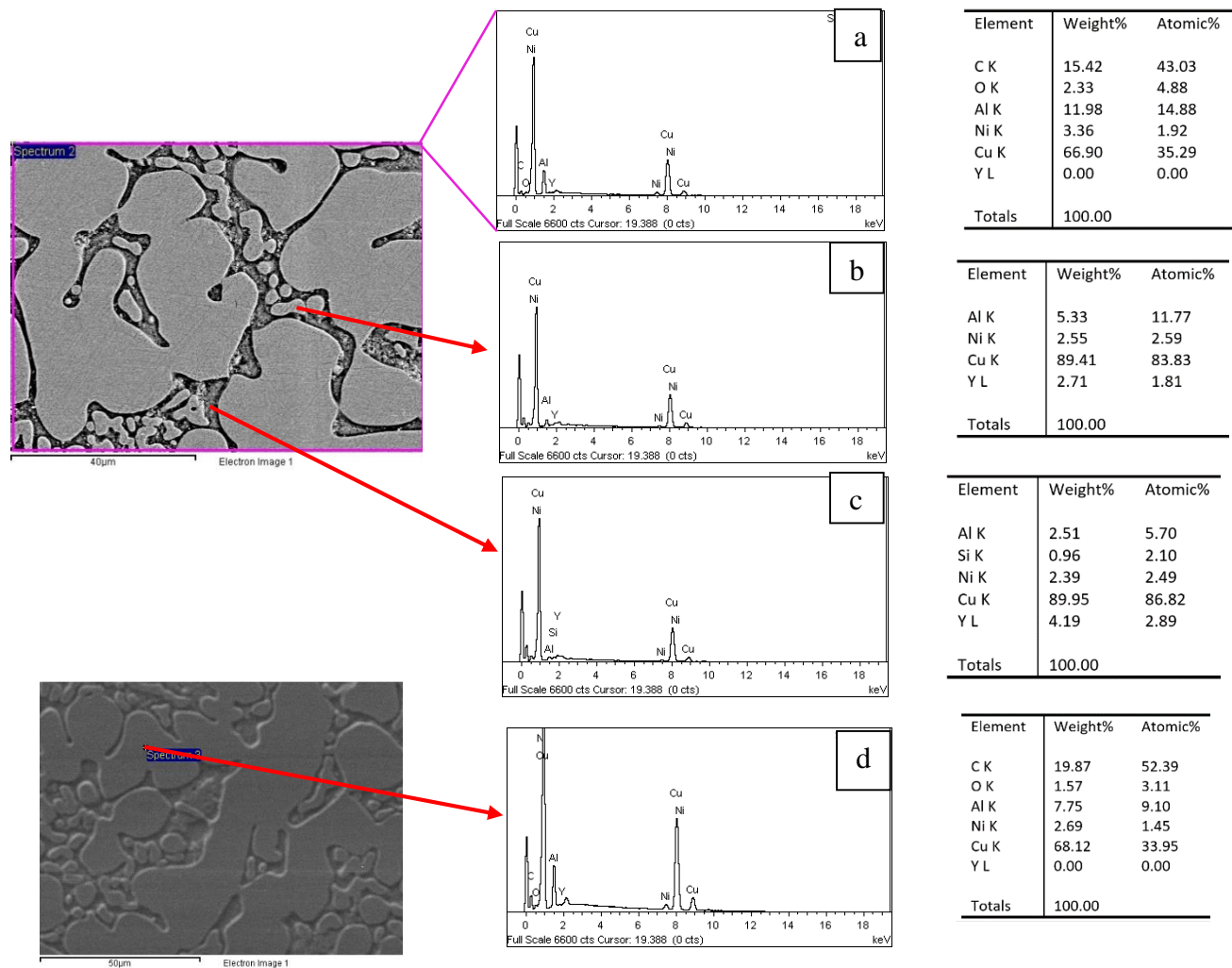
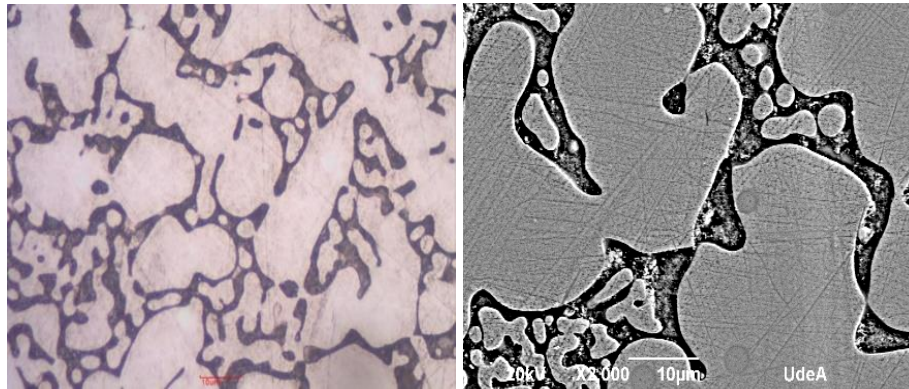


Figura 16 se presenta el diagrama de espectro de los elementos químicos de distintas zonas de la aleación y su correspondiente composición química. En la Figura 16(a) se presenta el espectro y composición de la zona generalizada, en la cual se observa que no hay itrio en esta aleación fue difícil encontrar zonas que presentaran el porcentaje de itrio esperado o planteado en el diseño de las aleaciones, se presume las mismas hipótesis ya mencionadas para la aleación con 5% wt de

itrio. En la Figura 16(b) se presenta la composición química en los granos eutecticos con una composición de 2.71%wt, en los límites de granos el itrio precipita presentando con un porcentaje de 4,2%wt (Figura 16(c)) indicando que el porcentaje de itrio se distribuyó en el eutectico y los límites de grano. En la Figura 16(d) se hizo la toma dentro de un grano se observa que no hay itrio.

Figura 17. Micrografías de la aleación Cu-13%Al-4%Ni-7%Y por microscopía óptica (1000X) y SEM (2000X).



La Figura 17 correspondientes a las micrografías de la aleación Al-13%Cu-4%Ni-7%Y se observa una estructura dendrítica correspondiente a granos de cobre, níquel y aluminio de color blanco, y el itrio en los límites de grano de color oscuro, el eutéctico presente en los límites grano presento una morfología nodular después del tratamiento térmico (Apéndice A), con el método planímetro o de Jeffries se calculó el tamaño de grano ASTM dando un número de 8 (ASTM Standards, 2021).

4.2 Ensayo de dureza

En la Tabla 2 se observa que la dureza (HRA) aumenta a medida que aumenta el porcentaje de Itrio en la aleación, tanto para las probetas con tratamiento térmico de temple como para las que no se templaron, las aleaciones de interés son aquellas templadas ya se esperaba que estas

tuvieran la estructura martensítica propias de las SMA. De estas aleaciones se observa que la aleación que no contenía Itrio presentó la dureza más baja; un valor de 45,9 HRA y la aleación con mayor porcentaje de Itrio (7%) presentó un valor de 67,7 HRA. El comportamiento de las aleaciones muestra que al aumentar el porcentaje del cuarto elemento aleante (Itrio), aumenta el valor de la dureza en más de un 45%.

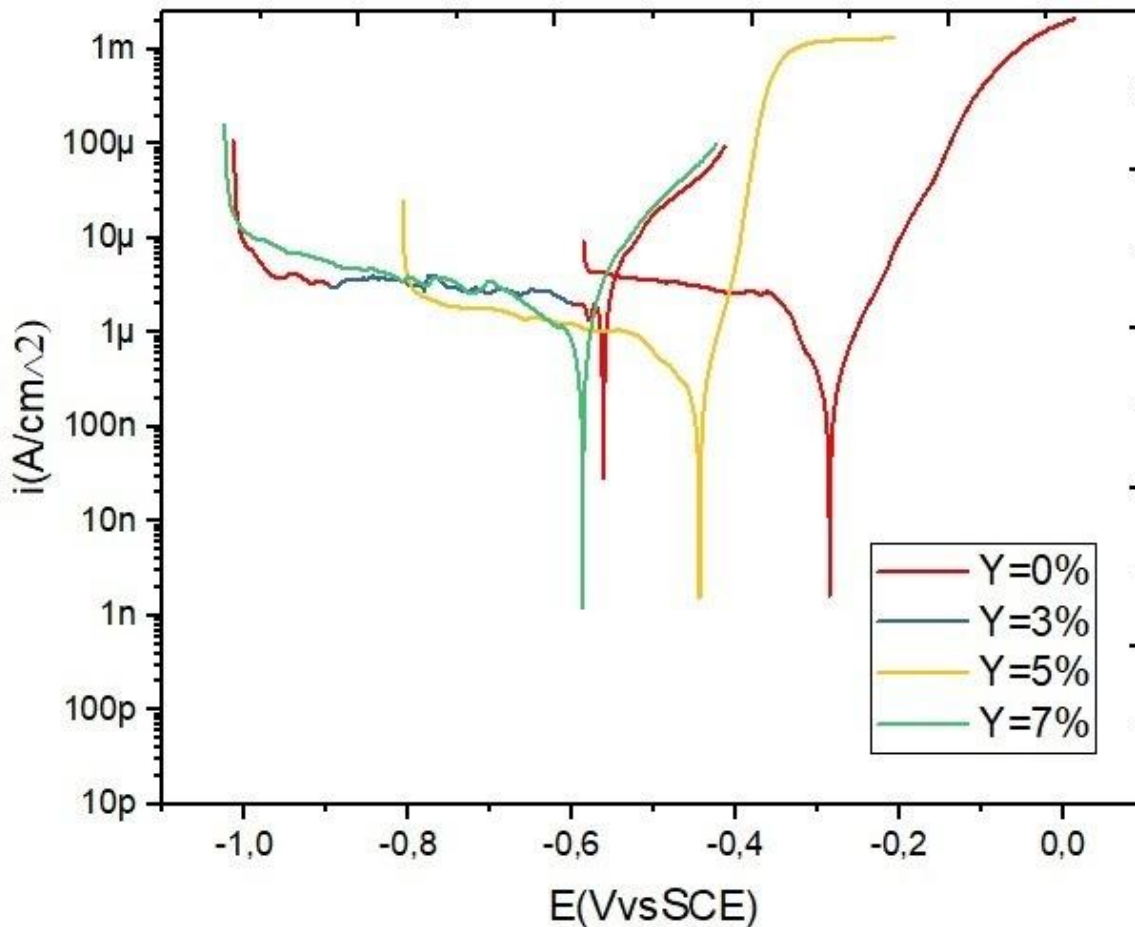
Tabla 2. Dureza promedio de las aleaciones Cu-Al-Ni-xY caracterizadas.

Probeta	Indentación						Promedio (HRA)
	1	2	3	4	5	6	
0%	47	43,5	46,5	46,5	47	45	45,9
0%TT	47	46	46,5	46,5	47	46	46,5
3%	57	49	44	53	57,5	53	52,3
3%TT	60	61	63	61	59,5	60	60,8
5%	54	63,5	64	66,5	57	64,5	61,6
5%TT	62	63	61	61	62,5	62,5	62,0
7%	66	67,5	66,5	65,5	67	65	66,3
7%TT	66	67,5	68,5	68	68	68	67,7

4.3 Resistencia a la corrosión

4.3.1 Curvas de Polarización

De la Figura 18 se observa por el comportamiento de las ramas catódicas de las curvas de polarización de las aleaciones que el proceso de corrosión puede estar influido en la interfase electrodo- electrolito por procesos de difusión o transferencia de masa en la cual muy posiblemente la especie a reducir se encuentra en concentraciones limitadas, por lo cual el transporte o la difusión de la especie desde el seno de la solución hacia la superficie del electrodo el proceso es más lento. Es de suma importancia que al menos una de las ramas de las curvas de polarización (de cada aleación) este bajo control de proceso de transferencia de carga en la interfase electrodo/electrolito.

Figura 18. Curvas de Polarización de las diferentes aleaciones fabricadas

Por medio de la extrapolación de Tafel se calcularon las pendientes según la norma ASTM 59-97, a 30mV del potencial de corrosión (E_{corr}). Los valores de E_{corr} nos permiten visualizar que material tendrá una mayor tendencia a corroerse desde un punto de vista termodinámico, sabiendo que una aleación con un valor de E_{corr} alto tendrá baja probabilidad a corroerse, en otras palabras, para un E_{corr} menor el material va a tender termodinámicamente a presentar procesos corrosivos. Con lo anteriormente mencionado, en la Figura 18 podemos apreciar que la aleación que termodinámicamente es más difícil que se corroa es la aleación base de Cu-13%Al-4%Ni cuyo

E_{corr} es de -285 mV y la muestra con un E_{corr} menor (-586 mV) es la aleación que contiene 7% wt de Itrio, la cual es la que presentara mayores procesos corrosivos. Desde el punto de vista cinético, se analiza la densidad de corriente del material ya que esta es directamente proporcional a la velocidad de corrosión. Esta velocidad de corrosión no es posible determinarla con certeza simplemente al ver la gráfica por lo cual se utiliza el método de extrapolación de Tafel, se debe tener presente que debido a que los procesos corrosivos están controlados por transferencia de masa, la pendiente de la rama catódica (β_c) tendrá valores muy altos tendiendo al infinito y conservando B en función de (β_a)(Apéndice C). Los resultados obtenidos de esta extrapolación se presentan en la Tabla 3, en la cual se observa que las aleaciones con adiciones de itrio se corroen más rápido que la aleación base o sin Itrio, la aleación con un porcentaje de 5% wt de Itrio presento una densidad de corriente mayor ($2,5 \mu A \cdot cm^2$) que la aleación base con $2.06 \mu A \cdot cm^2$.

En esta tabla también se presenta la resistencia a la polarización calculada según la norma ASTM G-102 y calculada por medio de la gráfica obtenida del ensayo de LRP al hacer un ajuste lineal y calcular su pendiente, se observa que la aleación que tiene una tendencia a menor a presentar procesos corrosivos es la aleación base de Cu-13%Al-4%Ni ya que tiene mayor resistencia a la polarización $3582 \Omega \cdot cm^2$.

Tabla 3. Resultados de prueba de corrosión realizadas en las aleaciones.

Aleación	icorr ($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^2$)	β_a (V/dec)	B (V)	R_p ASTM G102-23 ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	R_p LPR ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)
Cu-13%Al-4%Ni	2.06	17	7.38	3582	3246
Cu-13%Al-4%Ni-3%Y	2.22	13	5.64	2540	1646
Cu-13%Al-4%Ni-5%Y	2.5	40	17.36	2438	1050
Cu-13%Al-4%Ni-7%Y	2.29	9	3.90	1703	1349

En Tabla 4 se presenta el cálculo de la velocidad de corrosión con su ecuación correspondiente indicada en la norma ASTM G59 (Apéndice D). Teniendo la constante de 0.00327 mm*g/ $\mu\text{A}\cdot\text{cm}\cdot\text{año}$, una densidad de corriente $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, un peso equivalente del material g/equ y la densidad del material g/cm³. Por medio de la gráfica de LRP y el software Gamry Echem Analyst se pudo analizar que la aleación de Cu-13%Al-4%Ni-7%Y tiene mayor velocidad de corrosión, esto refuerza lo ya mencionado anteriormente, la tendencia a oxidarse aumenta con la adición del aleante itrio Y.

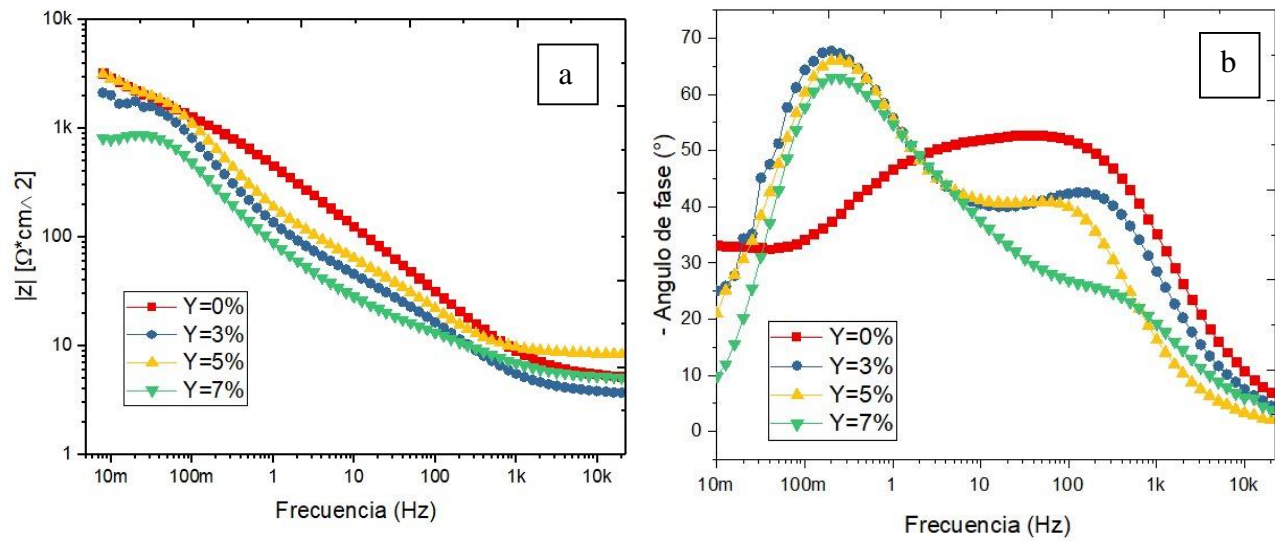
Tabla 4. Velocidad de corrosión en las aleaciones

Aleación	V_{corr} ASTM G59-97 (mpy)	V_{corr} LRP Gamry Echem (mpy)
Cu-13%Al-4%Ni	19.71	23.4
Cu-13%Al-4%Ni-3%Y	21.60	26.59
Cu-13%Al-4%Ni-5%Y	23.9	23.62
Cu-13%Al-4%Ni-7%Y	22.79	25.98

De la tabla 4, se observa que la mayoría de las velocidades de corrosión calculadas para cada aleación por los dos diferentes métodos fueron similares o con valores cercanos a excepción de la aleación con un porcentaje de 5% wt de Itrio, también se observa que las aleaciones con Itrio presentan una mayor tasa de corrosión cuando se calcula teóricamente.

4.3.2 Espectroscopia de impedancia electroquímica

En este método se mide la impedancia en función de la frecuencia que se representan por medio de las gráficas de Bode, en la Figura 19a, se observa que a bajas frecuencias la aleación con mayor módulo $|Z|$ a menores frecuencias fue la aleación de Cu-13%Al-4%Ni presentando la menor velocidad de corrosión. En cuanto a la aleación que presenta menor módulo de impedancia $|Z|$ teniendo una mayor velocidad de corrosión con respecto a las demás muestras es Cu-13%Al-4%Ni-7Y. Por lo cual podemos inferir que debido a la adición de itrio en la aleación de Cu-13%Al-4%Ni si hay un cambio en cuanto a la resistencia de corrosión. En la Figura 19b se observa que la aleación que no contiene Itrio presenta el menor ángulo a bajas frecuencias, pero este comportamiento cambia a medida que aumenta el valor de la frecuencia por lo cual presentara menos procesos corrosivos, nuevamente se observa que la aleación Cu-13%Al-4%Ni-7Y, presentara mayores procesos corrosivos ya que en toda la gráfica presenta el menor valor de ángulo de fase.

Figura 19. Diagramas de Bode para las aleaciones fabricadas con diferente porcentaje de Itrio.

5. Conclusiones

- La fabricación de aleaciones Cu-13%Al-4%Ni-xY con diferentes porcentajes de Itrio se llevó a cabo de manera exitosa ya que se cumplieron los parámetros establecidos en la metodología para la fabricación de la aleación, excepto para la aleación de Cu-13%Al-4%Ni-7%Y. Se observó un cambio en su microestructura y sus propiedades mecánicas como dureza y resistencia a la corrosión en función de la presencia de Itrio en la aleación,
- Se concluyó que el Itrio actuó como refinador de grano en las aleaciones fabricadas en este trabajo de investigación, por medio del análisis microestructural, se observó una disminución del tamaño de grano a medida que aumenta el contenido de itrio en la aleación, este refinamiento también se confirmó al calcular el tamaño de grano ASTM. La adición de itrio también alteró la microestructura, ya que se observa que al adicionar itrio la estructura pasó de martensítica a una estructura dendrítica, es decir no conservó la condición de SMA.
- El Itrio actuó como refinador de grano influyendo directamente en las propiedades mecánicas de las aleaciones aquí estudiadas, en este caso influyó en la dureza de las aleaciones, se observó que a mayor porcentaje de Itrio en las aleaciones la dureza de estas aumentó.
- La adición de Itrio en la aleación base cobre aquí estudiada hace que la resistencia a la corrosión disminuya, ya que hace más viable termodinámicamente que se presenten procesos corrosivos en esta aleación, al igual que la velocidad de corrosión aumenta a mayor porcentaje de Itrio contenido en la aleación.

6. Recomendaciones

- Para futuras investigaciones sobre el efecto del Itrio como microaleante se recomienda que el porcentaje en peso de este, no supere el 2%wt, ya que por la experiencia obtenida se observa que porcentajes mayores de Itrio afecta la microestructura que otorga las propiedades de memoria de forma, haciendo que esta propiedad se pierda.
- Respecto a la práctica se recomienda especial atención en la atmosfera protectora en el proceso de fundición, asegurando que esta atmosfera esté actuando en todo el momento del proceso, para evitar la oxidación de los elementos presentes en la aleación,
- En la preparación metalográfica se recomienda que sea hecha con especial cuidado no iniciar con papeles de lija tan abrasivos como lo puede ser el papel lija #80 es decir iniciar con lijas de mayor número y con una técnica que no genere un esfuerzo excesivo en el desbaste para evitar el desprendimiento de las fases.

Referencias Bibliográficas

- Adnan, R. S., Abbass, M. K., & Jomaa, D. M. (2021). Effect of tin addition on corrosion resistance and microstructure. *ELSEVIER*.
- Arias Navarro, S., & Mario, G. M. (2019). *ESTUDIO DE LA MICROESTRUCTURA Y RESISTENCIA A LA CORROSION DE LA ALEACION CON MEMORIA DE FORMA Cu-Al-Ni-Y ELABORADA POR FUNDICION*.
- ASTM Standards . (2022). *ASTM COMPASS*. Obtenido de Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials:
<https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CE0018-22%7Cen-US>
- ASTM Standards. (2017). *ASTM COMPASS*. Obtenido de Standard Guide for preparation of Metallographic Specimens:
<https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CE0003-11R17%7Cen-US>
- ASTM Standards. (2020). *ASTM COMPASS*. Obtenido de ASTM G59 Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements.
- ASTM Standards. (2021). *ASTM COMPASS* . Obtenido de ASTM E 91 Standard Test Methods for Determining Average Grain size .
- ASTM Standards. (2023). *ASTM COMPASS*. Obtenido de G102-Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements.
- Chapman, & Hall. (1998). *Handbook of Biomaterials Properties* (Vol. First edition). (J. Black, & G. Hastings, Edits.) London; New York: Springer Science+Business Media Dordrecht .
- Chengcong, H., Weihao, C., Liang, Q., Zhigang, W., & Guan, R. (2022). Role of rare-earth yttrium in the hydrogen embrittlement of AISI 321 austenitic stainless steel. *International Journal*

- of Hydrogen Energy*, 47(87), 37138-37152. Obtenido de www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922039842
- Dasgupta, R. (2014). A look into Cu-based shape memory alloys: Present scenario and future prospects. *Journal of Materials Research*, 29, 1681-1698.
- De la Flor, S. (2005). ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA.
- Dieter, S. (diciembre de 1990). Shape memory actuators for automotive applications. *Materials & Design*, 11(6), 302-307. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/026130699090013A>
- Furuya, I. (mayo de 1996). Design and Material Evaluation of Shape Memory Composites. *JOURNAL OF INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES*, 7. Obtenido de <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X9600700313>
- Furuya, Y. (1994). Intelligent Material Design Using Shape Memory Alloy. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*(360-519).
- Furuya, Y., & Shimada, H. (1991). Shape memory actuators for robotic applications. *Materials & Design*, 12, 21-28. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/026130699190088L>
- Gong, C., Wang, Y., & Yang, D. (2006). Phase transformation and second phases in ternary Ni-Ti-Ta shape memory alloys. *Material Chemistry and Physics*, 96, 183-187.
- Guo, Y., Wang, Y., & Chen, H. (2019). First-principles study on stability, electronic, mechanical and thermodynamic properties of Al-Cu-RE ternary compounds. *Solid State Communications*, 287, 63-67. Obtenido de www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038109818306343

- Hartl, D. J., & Lagoudas, D. C. (2007). Aerospace applications of shape memory alloys. *IMechE*, 221. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/268000759_Aerospace_applications_of_shape_memory_alloys
- Humphries, M. (30 de September de 2010). Rare Earth Elements: the Global Supply Chain. *Congressional Research Service*, 7. Obtenido de https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=uzkYstWv_HYC&oi=fnd&pg=PA1&ots=waxcTSvJkf&sig=nkKVO4NCR6CdhCkm5xKuXLns7V4&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials and Design*, 56, 1078–1113. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306913011345?via%3Dihub>
- Kim, H. (2006). Effect of Ta addition on shape memory behaviour of Ti-22Nb alloy. *Materials Science and Engineering A*, A 417, 120-128.
- Leinweber, G., Barry, D., Burke, J., Rapp, M., Block, R., & Danon, Y. (2014). Europium resonance parameters from neutron capture and transmission measurements in the energy range 0.01–200eV. *Annals of Nuclear Energy*, 69, 74-89. Obtenido de www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454914000590
- Li, M., Wang, H., & Wei, Z. (2009). Grain Refinement and Modification of Al-Cu Alloys with Yttrium. *Journal of Wuhan University of Technology*, 54-58. Obtenido de <http://www.cqvip.com/qk/84253x/2009s1/1003861147.html>

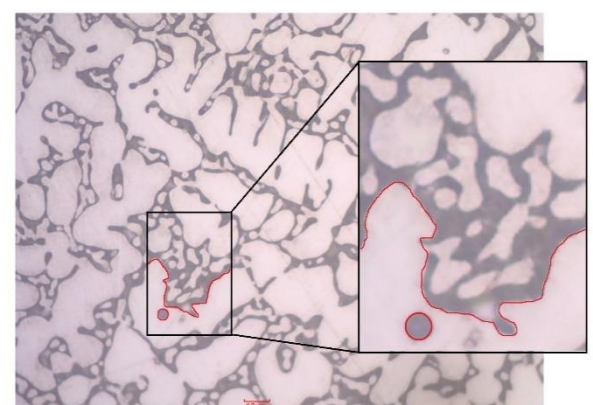
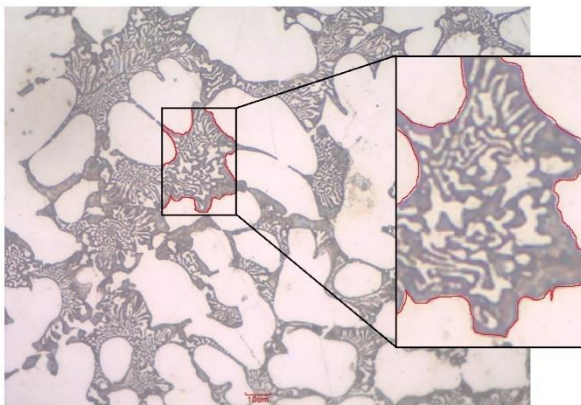
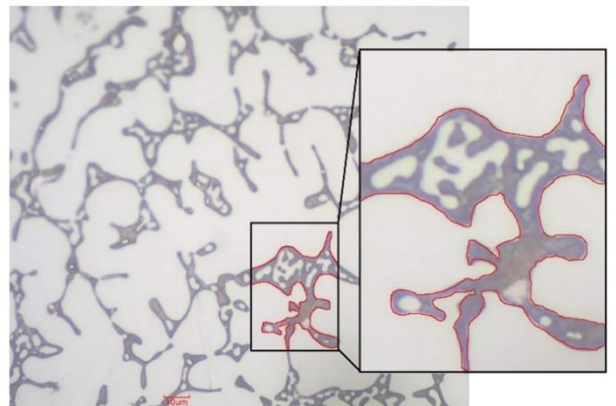
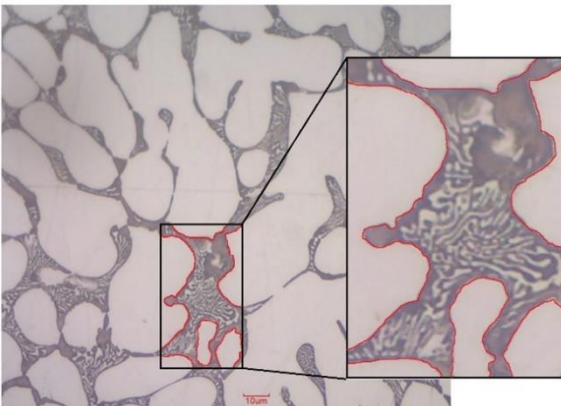
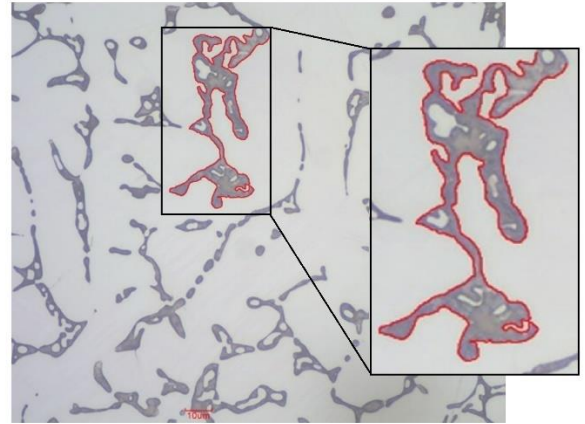
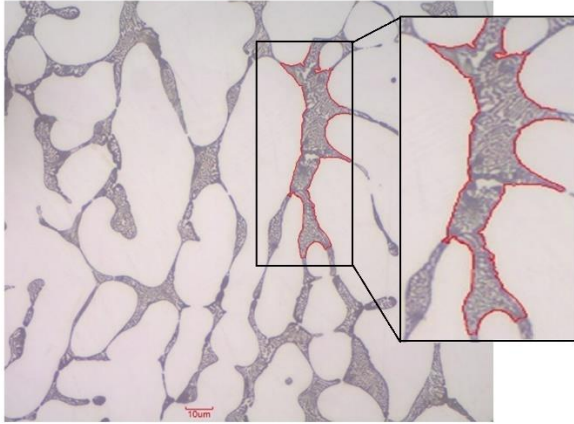
- Li, M., Wang, H., & Wei, Z. (2010). The effect of Y on the hot-tearing resistance of Al–5wt.% Cu based alloy. *Materials & Design*, 31(5), 2483-2487. Obtenido de www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909006645
- Marin, B. (2019). *El portal*. Obtenido de Anales de química de la RSEQ: <https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/1416>
- Metalvin Export. (s.f.). *Bandas de acero inoxidable y níquel*. Obtenido de Aleaciones cobre níquel (CuNi) - Características técnicas y aplicaciones: https://www.bandas-metalicas.es/aleaciones-cobre-niquel/#index_2_1
- Ming H, W., & L. McD, S. (2000). INDUSTRIAL APPLICATIONS FOR SHAPE MEMORY ALLOYS. *Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technolgies, Pacific Grove, California*, P.171-182. Obtenido de https://mrkspecialitymaterials.com/pdf/Tech%20Paper%20-%20Nitinol_Industrial_Applications.pdf
- Naresh, C., Bose, & Rao. (2016). Shape memory alloys: a state of art review . *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Petrini, L., & Migliavacc, F. (marzo de 2011). Review Article Biomedical Applications of Shape Memory Alloys. *Journal of Metallurgy*, 2011. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/258379628_Biomedical_Applications_of_Shape_Memory_Alloys
- Ping, D., Cui, C. Y., & Yin, F. (2006). TEM investigation on martensite in a Ti-Nb-based. *Scripta Materialia*, 54, 1305-1310.

- Pozdniakov, A., & Barkov, Y. (2018). Microstructure and materials characterisation of the novel Al–Cu–Y alloy. *Materials Science and Technology*, 34(12), 1489-1496. Obtenido de <https://doi.org/10.1080/02670836.2018.1460536>
- Pozdniakov, A., & Barkov, Y. (2018). Microstructure and materials characterisation of the novel Al–Cu–Y alloy. *Materials Science and Technology*, 1489-1496.
- Pozdniakov, A., & Yu, R. (2019). Microstructure, mechanical properties and superplasticity of the Al–Cu–Y–Zr alloy. *Materials Science and Engineering*, 758, 28-35. Obtenido de www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509319306021
- SEAS .Estudios Superiores Abiertos S.A.U. (2016). *BLOG DE SEAS, CENTRO DE FORMACIÓN TÉCNICA EN MODALIDAD ONLINE*. Obtenido de https://www.seas.es/blog/disenio_mecanico/materiales-con-memoria-de-forma-el-nitinol/
- Siakavelas, G., Charisiou, N., AlKhoori, A., Sebastian, V., Hinder, S., & Baker, M. (2022). Cerium oxide catalysts for oxidative coupling of methane reaction: Effect of lithium, samarium and lanthanum dopants. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 2213-3437. Obtenido de www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343722001324
- Strandberg, E. (2006). Caracterización de aleaciones de titanio con bajo módulo elástico y. *Proyecto Final de carrera en Universidad Politecnica de Catalunya*. Catalunya.
- Sun, L., & Huang, W. (2009). Nature of the multistage transformation in shape memory alloys upon heating. *Met Sci Heat Treat*, 51, 573-578.
- Sun, L., Huang, W., Ding, Z., & Zhao, Y. (2012). Stimulus-responsive shape memory materials: A review. *Materials & Design*, 33, 577-640. Obtenido de www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911003359

- Takagi, T. (1996). Recent Research on Intelligent Materials. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 7(3), 346-352. Obtenido de <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X9600700317>
- Van Langenhove, L., & Hertleer, C. (2004). Smart clothing: a new life. *International Journal of Clothing Science and Technology Emerald*, 16(1), 63 - 72.
- Wayman, C. M. (1992). SHAPE MEMORY AND RELATED. *Progress in Materials Science*, 36.
- Wegener, T., Klein, F., Litnovsky, A., Rasinski, M., Brinkmann, J., Koch, F., & Linsmeier, C. (2016). Development of yttrium-containing self-passivating tungsten alloys for future fusion power plants. *Nuclear Materials and Energy*, 9, 394-398. Obtenido de www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235217911530123X
- Zhang, X., Zhang, M., Cui, T., Li, J., Liu, Q., & Wang, H. (2019). The enhancement of the mechanical properties and the shape memory effect for the Cu-13.0Al-4.0Ni alloy by boron addition. *Journal of Alloys and Compounds*, 776, 326-333.

Apéndices

Apéndice A. Comparación del cambio de morfología del eutéctico debido al tratamiento térmico de temple, para cada una de las aleaciones con diferente porcentaje de Itrio.



En este apéndice se presentan las micrografías para las aleaciones Cu-13%Al-4%Ni-3Y, con Y=5% y Y= 7% respectivamente, antes y después del temple con el fin de comparar el cambio de la morfología del eutéctico después del temple. Observando que después del temple la fase rica en cobre presenta una morfología más nodular.

Apéndice B. Determinación del número de tamaño de grano ASTM de las aleaciones por medio del procedimiento planímetro (o de Jeffries') (ASTM Standards, 2021)

$$N_A = f \left(N_{Inside} + \frac{N_{Intercepted}}{2} \right) \quad (1)$$

Donde:

\overline{N}_A = numero de grano por mm^2

f es el multiplicador de Jeffries

N_{Inside} es el número de granos completamente dentro del círculo de prueba

$N_{Intercepted}$ es el número de granos que interceptan el círculo de prueba.

$$f = 0,0002 M^2 \quad (2)$$

Donde:

M= magnificación usada, en este caso 1000x

$$G = (3.321928 \log_{10} \overline{N}_A) - 2.954 \quad (3)$$

Donde:

\overline{N}_A = numero de grano por mm^2

Aleación Cu-13%Al-4%Ni:

Usando (1)

$$N_A = 2 \left(\frac{4}{2} \right) = 4$$

Usando (3)

$$G = (3.321928 \log_{10} 8) - 2.954 = 6.5 = 3$$

Aleación Cu-13%Al-4%Ni-3%Y:

Usando (1)

$$N_A = 200 \left(\frac{7}{2} \right) = 700$$

Usando (3)

$$G = (3.321928 \log_{10} 700) - 2.954 = 6.5 = 6$$

Aleación Cu-13%Al-4%Ni-5%Y:

Usando (1)

$$N_A = 200 \left(1 + \frac{6}{2} \right) = 800$$

Usando (3)

$$G = (3.321928 \log_{10} 800) - 2.954 = 6.7 = 7$$

Aleación Cu-13%Al-4%Ni-7%Y:

Usando (1)

$$N_A = 200 \left(8 + \frac{11}{2} \right) = 2700$$

Usando (3)

$$G = (3.321928 \log_{10} 800) - 2.954 = 8.4 = 8$$

Apéndice C. Determinación de la resistencia a la polarización según la norma ASTM G102

Calculo las constantes de Stern-Geary a partir de pendientes de Tafel conocidas donde las reacciones catódicas y anódicas están controladas por activación,

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \quad (1)$$

Donde:

B_a= pendiente anódica

B_c= pendiente catódica

En los casos en que una de las reacciones esté controlada puramente por difusión, la constante de Stern-Geary puede calcularse:

$$B = \frac{B_a}{2.303} \quad (2)$$

la resistencia de polarización se puede calcular a partir de la densidad de corriente de corrosión y la constante Stern-Gary.

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (3)$$

R_p = Resistencia a la polarización, ohm cm².

Calculo tipo para la aleación de 0%Y:

Por medio del método de extrapolación de tafel se encontró el valor de icor y la pendiente anódica

I_{corr}= 2.06

$$\beta a = 17$$

$$B \frac{17}{2.303} = 7.38$$

Usando (3)

$$R_p = \frac{B}{i_{corr}} = \frac{7.38}{2.06} = 3583 \Omega * cm^2$$

Apéndice D. Determinación de la velocidad de corrosión según la norma ASTM G59-97

$$CR = \frac{k * i_{corr} * EW}{d}$$

Donde:

Cr: Velocidad de corrosión

I corr: Corriente de corrosión

EW: Peso equivalente

d: Densidad de la muestra

Tenemos que:

$$i_{corr} = 2.06$$

La densidad de la muestra de 0% Y esta dada por; la sumatoria del porcentaje del elemento presente en la muestra multiplicado por su densidad:

$$d = (\%Cu * dCu) + (\%Al * dAl) + (\%Ni * dNi) + (\%Y * dY)$$

$$d = (0.83 * 8.96) + (0.13 * 2.7) + (0.04 * 8.9) + (0 * 4.47)$$

$$d = 8.14 \text{ g/cm}^3$$

EW: es el recíproco de Nequ que viene dado por la sumatoria del porcentaje del elemento presente en la muestra multiplicado por su valencia (n) y dividido en el peso molecular

$$\mathbf{Nequ} = (\%Cu*n)/PM + (\%Al*n)/PM + (\%Ni*n)/PM + (\%Y*n)/PM$$

$$\mathbf{Nequ} = (0.83*2)/63.54 + (0.13*3)/26.9 + (0.04*2)/58.6 + 0*3/88.9$$

$$\mathbf{Nequ} = 0.04198$$

$$\mathbf{EW} = 23.82$$

$$\mathbf{CR} = \frac{(3.27 * 10 - 3) * (2.06) * 23.82}{8.14}$$

$$\mathbf{CR} = 19,71 \text{ mpy}$$