

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA**

**UNIDAD AZCAPOTZALCO**

LICENCIATURA EN INGENIERÍA METALÚRGICA

DIVISIÓN CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

PROYECTO DE INTEGRACIÓN

“EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS SOBRE LA  
MICROESTRUCTURA Y LA DUREZA DE LA ALEACIÓN  
Cu - 10%Al - 3%Ag”

Trimestre 22-P

**Presenta:**

Eduardo Sánchez Pérez

Matrícula: 2112044810

**Asesor:** Dr. Miguel Ángel Suárez Rosales

**Co-Asesor:** M en C. Daniel Flores Sánchez

**PIA-MET**

## **DECLARATORIA**

Yo, Miguel Ángel Suárez Rosales, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Daniel Flores Sánchez, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Eduardo Sánchez Pérez, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco

## **AGRADECIMIENTOS**

**Estas palabras van dirigidas para las personas más importantes en este camino mis padres, sin ellos nada de esto sería posible, agradezco su experiencia y consejos, a mis hermanos por darme las fuerzas necesarias para concluir los estudios.**

**A mi asesor que me brindó todo el apoyo que necesite ininidad de veces.**

**A Dios que siempre estuvo ahí aún en los momentos más complejos y difíciles.**

**¡Muchas Gracias!**

## RESUMEN

Debido a la mejora continua que cada vez se refleja más en el sector industrial se busca optimizar procesos mejorando propiedades, costos y formas más eficientes de producción, a raíz de estos cambios, se busca implementar nuevos materiales que posean dichas cualidades que permitan cumplir con los estándares y especificaciones necesarias.

Dicho de otra manera, mejorar el proceso en todos los aspectos posibles, por ende, el estudio de este proyecto busca mejorar las propiedades mecánicas de las aleaciones no ferrosas en particular la cobre, aluminio, plata utilizando tratamientos térmicos tales como: *Difusión y Desplazamiento*.

Se realizará una analogía de los tratamientos térmicos, partiendo de un homogeneizado a 200°C para eliminar la segregación dendrítica y gradiente de concentración, durante intervalos definidos y tomando como referencias sus durezas, dicho lo anterior se podrá determinar que tratamiento térmico es el más eficiente.

## CONTENIDO

1.- Introducción .....	8
2.- Antecedentes.....	9
3.- Justificación .....	10
3.1 Social .....	10
3.2 Científico-Tecnológica .....	10
3.3 Ambiental .....	10
4.- Objetivo .....	10
4.1 Objetivos específicos.....	10
4.2 Objetivos operativos .....	11
5.- Marco Teórico.....	12
5.1 Tratamiento térmico de disolución.....	12
Recocido.....	12
Recocidos de regeneración: .....	12
Recocidos Subcríticos.....	12
Recocido de ablandamiento .....	12
5.2 Homogeneizado .....	12
5.3 Tratamiento de solubilizado y envejecido .....	12
5.4 Betatizado .....	13
5.5 Aleaciones con memoria de forma. ....	13
5.6 Aleaciones base Cobre .....	15
5.7 Cobre y sus aleaciones .....	15
Propiedades de importancia .....	16
5.8 Aleaciones Cu-Al-Ag .....	16
5.9 Ensayo de dureza .....	18
5.10 Calorimetría.....	19
6.- Metodología.....	20
6.1 Elaboración de la aleación.....	20
6.2 Tratamientos térmicos .....	31
6.3 Análisis Metalográfico .....	37
6.4 Ensayo de dureza .....	39
7.- Calorimetría.....	40
8.-Resultados .....	42
8.1 Micrografías .....	42

8.2 Valores ensayo de dureza .....	54
8.3 Valores Ensayo calorimetría.....	55
9.- Análisis de resultados.....	55
10.- Conclusiones .....	61
11.- Referencias .....	62

## 1.- Introducción

Debido a que las aleaciones Cu-Al pueden ser tratadas térmicamente con distintos tratamientos térmicos y con esto poder modificar su microestructura y propiedades como, por ejemplo: Difusión y Desplazamiento, mejor conocidos como; recocidos, homogenizado, solubilizado-envejecimiento y betatizado respectivamente, este último es de suma importancia para la obtención de (transformación martensítica), que a su vez da paso a las aleaciones con memoria de forma.

En los últimos años se han desarrollado nuevas aleaciones con memoria de forma (SMA), esto se ve reflejado en diversos estudios sobre aleaciones con base cobre, diversas fuentes citan que la aleación Cu-Al al ser un sistema binario posee temperaturas de transformación demasiado altas, sin embargo, la adición de Ag puede modificar la transformación martensítica, revelando una transformación termoelástica y posible efecto de memoria de forma.

Tabla 1. Clasificación general de las aleaciones de Cu<sup>1</sup>

NOMBRE GENERICO	UNS	COMPOSICION
<b>Aleaciones forjadas</b>		
Cobre	C10100 – C15760	>99% Cu
Aleaciones de alto contenido de Cu	C16200 – C19600	>96% Cu
Latones	C205 – C28580	Cu – Zn
Latones al plomo	C31200 – C38590	Cu – Zn – Pb
Latones al estaño	C40400 – C49080	Cu – Zn – Sn – Pb
Bronce fosforico	C50100 – C52400	Cu – Sn – P
Bronce fosforico al plomo	C53200 – C54800	Cu – Sn – Pb – P
Cu fosforico y aleaciones de Cu, Ag y P	C55180 – C55284	Cu – P – Ag
Bronces al Aluminio	C60600 – C64400	Cu – Al – Ni – Fe – Si – Sn
Bronce al silicio	C64700 – C66100	Cu – Si – Sn
Aleaciones de Cobre Zn	C66400 – C69900	.....
Cupro – Niquel	C70000 – C79900	Cu – Ni – Fe
Niquel Plata	C73200 – C79900	Cu – Ni – Zn
<b>Aleaciones fundidas</b>		
Cobre	C80100 – C81100	>99% Cu
Aleaciones de alto contenido de Cu	C81300 – C82800	>94% Cu
Latón rojo al plomo y latón rojo	C83300 – C85800	Cu – Zn – Sn – Pb
Latón amarillo al Plomo y latón amarillo	C85200 – C85800	Cu – Zn – Sn – Pb
Manganeso y bronce al manganeso plomo	C86100 – C86800	Cu – Zn – Mn – Fe – Pb
Bronce al Silicio, Latón al silicio	C87300 – C87900	Cu – Zn – Si
Bronce al Sn y Bronce Sn - Pb	C90200 – C94500	Cu – Sn – Zn – Pb
Bronce al Ni – Sn	C94700 – C94900	Cu – Ni – Sn – Zn – Pb
Bronce al aluminio	C95200 – C95810	Cu – Al – Fe – Ni
Cupro-niquel	C96200 – C96800	Cu – Ni – Fe
Ni Ag	C97300 – C97800	Cu – Ni – Zn – Pb – Sn
Cu Pb	C98200 – C98800	Cu – Pb
Aleaciones misceláneas	C99300 – C99750	.....

## 2.- Antecedentes

En términos generales un tratamiento térmico (transformaciones en estado sólido) es un conjunto de ciclos donde se ven incluidos (calentamiento y enfriamiento) a los cuales son sometidos los metales para modificar su microestructura y, por ende, sus propiedades. La sociedad Americana de Metales (ASM) los define como una combinación de calentamiento y enfriamiento de tiempos determinados y aplicados a un metal o aleación en forma tal que producirá propiedades deseadas.

Si bien, el proceso tiende a ser simple, existen diversas variables que involucran a este, cada una otorga una amplia gama de resultados, estas variantes son importantes debido a que, con una pequeña modificación de cantidades entre un proceso y otro, pueden dar resultados pocos comunes.<sup>1</sup>

### **Variables importantes a considerar:**

**Composición química:** esta variable es sumamente importante para la obtención de resultados, usualmente maneja porcentajes.

**Temperatura:** en cada tratamiento, esta suele generar o no una recristalización del material, disolución del elemento en otro, etc.

**Tiempo de permanencia:** parámetro muy importante, con el podemos considerar si habrá alguna transformación.

**Otras variables:** aunque de menos importancia que son necesarias tomar en cuenta, son: geometría de la pieza, tipos de hornos, atmosfera utilizada, medio de enfriamiento.<sup>2</sup>

Las transformaciones en estado sólido son de dos tipos: **de difusión y de desplazamiento**. Las transformaciones por difusión son aquellas en las que solo se puede formar una nueva fase moviendo átomos aleatoriamente a distancias relativamente grandes. Se requiere un amplio rango de difusión porque la nueva fase es de diferente composición química que la matriz de la que se forma.

Dado que se requiere una migración atómica, la evolución de este tipo de transformación depende del tiempo y la temperatura. Sin embargo, las transformaciones por desplazamiento no requieren un amplio rango de movimientos y en este caso los átomos se reordenan para llegar a una nueva estructura cristalina más estable, pero sin cambiar la naturaleza química de la matriz. Dado que no es necesario una migración atómica, estas transformaciones por desplazamiento son independientes del tiempo y el movimiento de la interface entre las dos fases es extremadamente rápido, cercanas a la velocidad del sonido. Se suelen llamar transformaciones atérmicas, dado que la cantidad de nueva fase creada usualmente solo depende de la temperatura y no del tiempo a esa temperatura. Las transformaciones martensíticas son de este tipo.

Los procesos de tratamiento térmico que se aplican al cobre y sus aleaciones incluyen homogeneización, recocidos, tratamiento por disolución, endurecimiento por precipitación (envejecimiento), el betatizado (tratamiento especial para aleaciones de cobre con memoria de forma).

### **3.- Justificación**

#### 3.1 Social

Teniendo en cuenta que las aleaciones Cu-Al son de bajo costo y de múltiples usos en la actualidad y a largo plazo, realizar una analogía de la aleación Cu-Al-Ag y modificarla microestructuralmente beneficiará mucho al sector industrial debido a su gran demanda.

#### 3.2 Científico-Tecnológica

Teniendo presente el potencial de las aleaciones de Cu-Al en este documento se describe de manera breve, el interés por desarrollar, elaborar y sintetizar aleaciones ternarias, basadas en el sistema Cu-Al, que a su vez darán pie a las aleaciones con memoria de forma (SMAs).

Ahora bien, es de suma importancia el estudio de las aleaciones ternarias con el fin de obtener su potencial y visualizar sus aplicaciones tecnológicas.

#### 3.3 Ambiental

Debido a que esta aleación es sumamente reciclable puede ser utilizada de manera segura, cabe destacar que la importancia de esta aleación ayudará bastante en sectores donde normalmente se utilizan materiales de un solo uso.

### **4.- Objetivo**

Estudiar el efecto de diversos tratamientos térmicos de difusión y desplazamiento sobre los cambios microestructurales y de dureza de la aleación Cu-10%Al-3%Ag.

#### 4.1 Objetivos específicos

- Fabricar la aleación Cu-10%Al-3%Ag mediante moldeo en arena
- Caracterizar la estructura de colada.
- Realizar los tratamientos térmicos de difusión: recocido, solubilizado-envejecido y normalizado.
- Realizar los tratamientos térmicos de desplazamiento: betatizado
- Analizar el cambio de la microestructura y morfología de cada probeta con cada tratamiento térmico.

- Determinar las temperaturas de transformación de la martensita no ferrosa mediante calorimetría.
- Medir los cambios de dureza de la aleación para cada tratamiento térmico.

#### 4.2 Objetivos operativos

- Fabricar 2 Kg de la aleación Cu-10% Al-3%Ag, usando el proceso de fundición y moldeo en verde.
- Comprobar composición química por espectrometría de emisión atómica.
- Cortar once probetas:

-Probeta número uno, utilizada como probeta testigo para comparar con los resultados finales.

-Probeta número dos, realizar un tratamiento térmico de homogenizado, a una temperatura de 200°C durante 2 h y posteriormente dejar enfriar al aire libre.

-Probeta tres a la seis realizar tratamiento térmico de homogenizado a una temperatura de 200°C durante 2 h, posteriormente realizar un tratamiento térmico de betatizado, variando el tiempo de permanencia (15 min., 30 min., 1hr., 2 hr.) respectivamente, a una temperatura de 900°C.

- Realizar un temple a cada probeta en agua a una temperatura de 100°C aproximadamente durante 1 minuto, tratando agitar la probeta.
- Probetas 7-9 se les efectúa el tratamiento de solución –envejecimiento: La temperatura de solubilización será de 780°C (del diagrama de fases) y el tiempo de 1h. Después de este tiempo las probetas se enfriarán en agua. Las condiciones de este tratamiento se determinarán por calorimetría.
- Probetas 10 y 11 se les efectuara tratamientos térmicos recocido y normalizado. La temperatura será de 900°C durante 1 h. En normalizado la probeta se extraerá del horno y se enfriará al aire, mientras que la recocida se enfriará dentro del horno.
- Caracterizar microestructuralmente la aleación en estado de colada y tratada térmicamente.
- Realizar ensayo de Calorimetría a viruta de la aleación tratando de que esta sea lo más fina posible, para determinar la temperatura del tratamiento térmico de envejecimiento y también las temperaturas de transformación martensíticas (**Ms**, **Mf**, **As** y **Af**).
- Realizar ensayo de Microdureza Vickers a cada probeta.

## 5.- Marco Teórico

A continuación, se hace una breve descripción de estos tratamientos térmicos, que suelen ser utilizados en aleaciones no ferrosas, como por ejemplo cobre-aluminio, cobre-zinc, cobre-aluminio-berilio entre muchos otros.

### 5.1 Tratamiento térmico de disolución

#### Recocido

El tratamiento térmico denominado como recocido tiene como principal objetivo ablandar al metal; otra utilidad es regenerar su estructura y así mismo erradica tensiones internas. Consiste básicamente en calentamientos a temperaturas idóneas, seguido de enfriamiento lentos y controlados, existen diferentes clases de recocido estos son catalogados en grupos.

#### Recocidos de regeneración:

Se realizan por encima de la temperatura crítica seguida de enfriamientos lentos que fomentan la regeneración de la estructura y ablandamiento del metal.

#### Recocidos Subcríticos

Este tratamiento se caracteriza por ser efectivo por debajo de la temperatura crítica, una característica importante de este proceso es que no importa el medio de enfriamiento ya que este no endurecerá, aumentando su ductilidad y eliminando las tensiones del material.

#### Recocido de ablandamiento

Tal como su nombre lo indica su objetivo es ablandar el metal, el proceso consiste en el calentamiento del metal a cierta temperatura que garantice que se encuentra por debajo de la temperatura crítica, posteriormente se deja enfriar al aire libre.

### 5.2 Homogeneizado

El homogeneizado es un tratamiento térmico que se realiza a altas temperaturas por tiempos considerablemente largos, con el propósito de la eliminación y disminución de segregación dendrítica. Se aplica a las aleaciones de cobre para mejorar la ductilidad en frío y en caliente, ocasionalmente se aplica a las piezas fundidas para cumplir los requisitos de dureza, ductilidad o tenacidad. Pag 1845 Handbook

### 5.3 Tratamiento de solubilizado y envejecido

El tratamiento de solubilizado consiste en calentar una muestra desde temperatura ambiente hasta una temperatura donde exista una fase. La temperatura de solubilizado se determina a partir del diagrama de fases, el tiempo de tratamiento varía dependiendo de factores como la composición química, tamaño y geometría de las muestras. Después de un tiempo de permanencia a la temperatura de solubilización,

la probeta se enfría rápidamente en agua para retener la fase de alta temperatura. Posteriormente, la probeta solubilizada se calienta a una temperatura apropiada para promover la precipitación de finos compuestos en toda la matriz y con ello endurecerla, mientras que el tratamiento de precipitación en concreto, se busca calentar la muestra saturada  $\alpha$  a una temperatura intermedia en una región bifásica, la temperatura varía con respecto a la velocidad de difusión, la fase que tiende a precipitar es  $\beta$ , generará partículas dispersas, su dureza y resistencia dependen de temperatura de precipitación y tiempo de envejecimiento.  
(Callister, 2009)

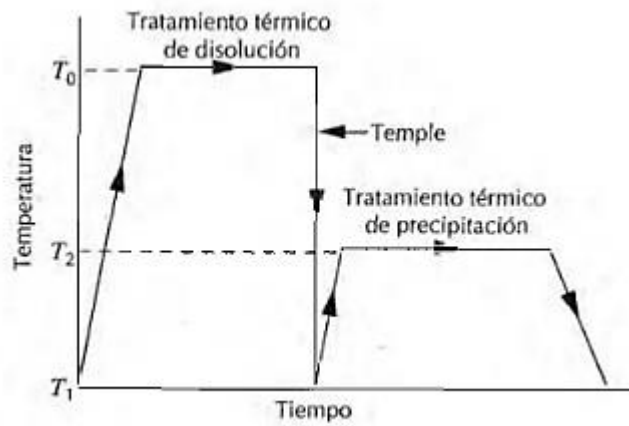


Figura 1. Gráfica de Temperatura vs tiempo en un tratamiento térmico de disolución y precipitado (Callister, 2009) pág. (351)

#### A) Tratamientos térmicos de desplazamiento

##### 5.4 Betatizado

Para las aleaciones de cobre, el betatizado consiste en calentar la muestra por encima de los  $900^{\circ}\text{C}$  (temperatura en el diagrama de fases donde está presente la base  $\beta$ ) por una duración de 1-2h aproximadamente, debido a que a esta temperatura la fase austenítica comienza a presentarse de manera estable, seguido de un temple escalonado que significa un enfriamiento brusco hasta una temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$  manteniendo por un tiempo determinado para concluir con un enfriamiento a temperatura ambiente. Este tratamiento térmico tiene como propósito generar martensitas no ferrosas..<sup>3</sup>

##### 5.5 Aleaciones con memoria de forma.

Un grupo relativamente nuevo de metales que exhiben un fenómeno interesante y prácticos son las aleaciones con memoria de forma o Shape Memory Alloys (SMA).

Uno de estos materiales, después de ser deformados, tiene la capacidad de volver a su tamaño y forma predefinidos al ser sometido a un tratamiento térmico adecuado, es decir, el material "recuerda" su tamaño / forma anterior.

La deformación normalmente se lleva a cabo a una baja temperatura, mientras que se produce memoria de forma sobre el calentamiento. Materiales que se han encontrado capaz de recuperar cantidades significativas de deformación (es decir, deformación) son aleaciones de níquel-titanio (Nitinol, 6 es su nombre comercial) y algunas aleaciones a base de cobre (Aleaciones Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni y Cu-Al-Ag).

Una aleación con memoria de forma es polimórfica, es decir, puede tener dos estructuras cristalinas (o fases), y el efecto de memoria de forma implica transformaciones fase entre ellas. Una fase (denominada fase austenita) tiene una estructura cúbica centrada en el cuerpo que existe a temperaturas elevadas; su estructura es representada esquemáticamente por el recuadro que se muestra en la etapa 1 de la Figura 1. <sup>4</sup>

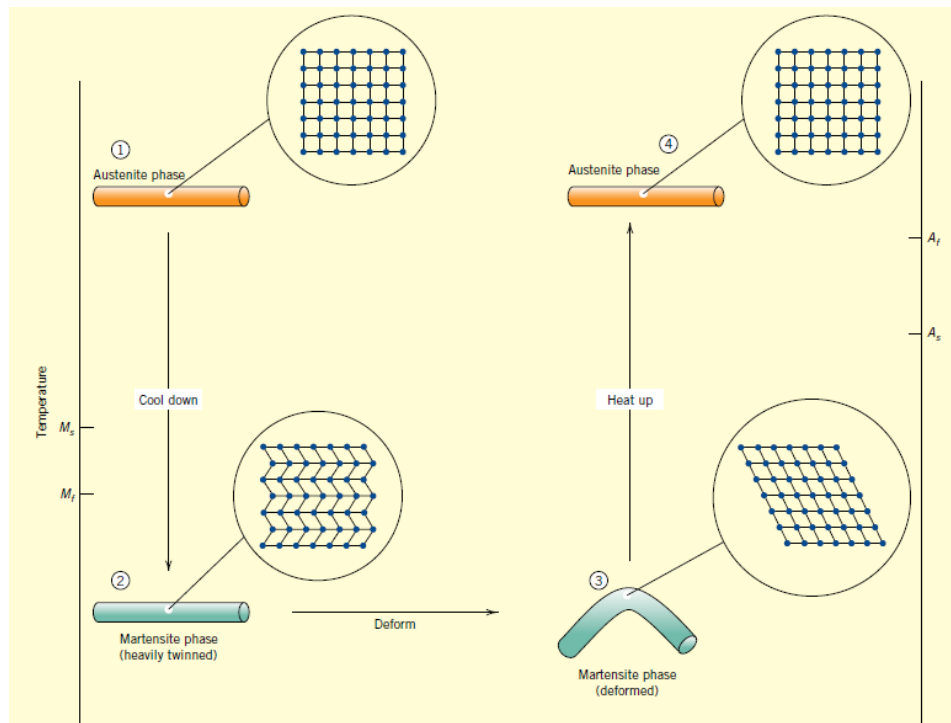


Figura 2. Diagrama que ilustra el efecto de memoria de forma. (Callister, 2009)

Los recuadros son representaciones esquemáticas de la estructura cristalina en las cuatro etapas.  $M_s$  y  $M_f$  denotan temperaturas del inicio y final de la transformación martensítica, respectivamente. Asimismo, para la transformación de austenita,  $A_s$  y  $A_f$  representan las respectivas temperaturas de transformación inicial y final.<sup>5</sup>

Al enfriarse, la austenita se transforma espontáneamente en una fase de martensita, que es similar a la transformación martensítica para el hierro-carbono, es decir, no tiene difusión, implica un cambio ordenado de grandes grupos de átomos, y ocurre

muy rápidamente, y el grado de transformación depende de la temperatura; temperaturas a las que la transformación comienza y termina están indicados por **Ms** y **Mf**, respectivamente, en el eje vertical izquierdo de la Figura 1.

Además, esta martensita está fuertemente maclada, como se representa esquemáticamente en el recuadro de la etapa 2 de la Figura 1. Bajo la influencia de una tensión aplicada, la deformación de la martensita (es decir, el paso de etapa 2 a etapa 3) ocurre por la migración de fronteras maclas: algunas regiones macladas crecen mientras que otras se reducen; esta estructura martensítica deformada está representado por el recuadro de la etapa 3. Además, cuando se elimina la tensión, se conserva la forma deformada a esta temperatura. Finalmente, tras el calentamiento posterior a la temperatura inicial, el material vuelve a (es decir, "recuerda") su tamaño y forma originales (etapa 4). Este proceso de la etapa 3 a la etapa 4 se acompaña de una transformación de fase de la martensita deformada a la fase austenita de alta temperatura original. Para estas aleaciones con memoria de forma, la transformación de martensita a austenita ocurre en un rango de temperatura, entre las temperaturas indicadas por **As** (inicio de austenita) y **Af** (fin de austenita) en el eje vertical derecho de la Figura 1. Este ciclo de deformación-transformación puede repetirse para el material con memoria de forma.

La forma original (la que debe recordarse) se crea calentando muy por encima de la temperatura **Af** (de modo que la transformación a austenita sea completa) y luego restringiendo el material a la forma de memoria deseada durante un período de tiempo suficiente. Por ejemplo, para las aleaciones de Nitinol, es necesario un tratamiento de 1 hora a 500 ° C.

Aunque la deformación experimentada por las aleaciones de memoria de forma es semipermanente, no es realmente una deformación "plástica", ni es estrictamente "elástica".

Más bien, se denomina termoelástico, porque la deformación no es permanente cuando el material deformado se trata posteriormente con calor.<sup>4,6,7</sup>

## 5.6 Aleaciones base Cobre

De entre una gran diversidad de aleaciones que presentan un estado de memoria de forma se encuentra aleaciones base cobre, en caso particular nos enfocaremos en este tipo de aleaciones, a continuación, una breve clasificación de cobre y sus aleaciones.

## 5.7 Cobre y sus aleaciones

El cobre y sus aleaciones se dividen en nueve grupos principales. Estos grupos principales son:

- Los cobres, que contienen un mínimo de 99,3% Cu
- Las aleaciones de alto contenido de cobre, que contienen hasta un 5% elementos de aleación

- Las aleaciones de cobre y zinc (latón), que contienen hasta el 40% de Zn
- Las aleaciones de cobre-estaño (bronce fosforoso), que contienen hasta un 10% de Sn y un 0,2% de fósforo (P)
- Las aleaciones de cobre y aluminio (bronces al aluminio), que contienen hasta un 10% de Al
- Aleaciones de cobre-silicio (bronces de silicio), que contienen hasta un 3% de Si
- Las aleaciones de cobre-níquel, que contienen hasta 30% de Ni
- Aleaciones de cobre-zinc-níquel (níquel-plata), que contienen hasta un 27% de Zn y un 18% de Ni
- Las aleaciones especiales, que contienen elementos de aleación para mejorar una propiedad o característica específica como la maquinabilidad.<sup>8</sup>

Tanto el cobre y sus aleaciones poseen grandes propiedades, una de ellas sería la maquinabilidad, ductilidad y maleabilidad todas estas propiedades hacen que el cobre sea uno de los metales más importantes en la industria, algunos criterios importantes serían los siguientes:

#### Propiedades de importancia

Los criterios para el cobre y las aleaciones de cobre son:

- Conductividad eléctrica
- Conductividad térmica
- Resistencia a la corrosión
- Color
- Facilidad de fabricación.

#### 5.8 Aleaciones Cu-Al-Ag

Las aleaciones a base de Cu-Al son materiales convenientes para su aplicación en ingeniería, bioingeniería, medicina, electrónica, tecnología espacial, etc.<sup>1,3,6</sup> Son aleaciones que pueden ser maleables en frío cuando el contenido de aluminio es inferior al 10% y en caliente cuando es superior a esta cantidad, se pueden fabricar componentes de cualquier forma y tamaño, adicional su elaboración no dependerá de su ductilidad y trabajabilidad. La combinación de Cu-Al tiene características de memoria de forma bien definidas, pero las temperaturas de transformación son demasiado elevadas para los usos generales; este problema suele solucionarse agregando un tercer elemento aleante como la plata.<sup>9</sup>

Los diagramas de fases que se han utilizado para el análisis microestructural de este sistema de aleación presentan en la siguiente figura, (figura 2) En la tabla 2 se presentan las fases presentes en el sistema de aleación Cu-Al-Ag.

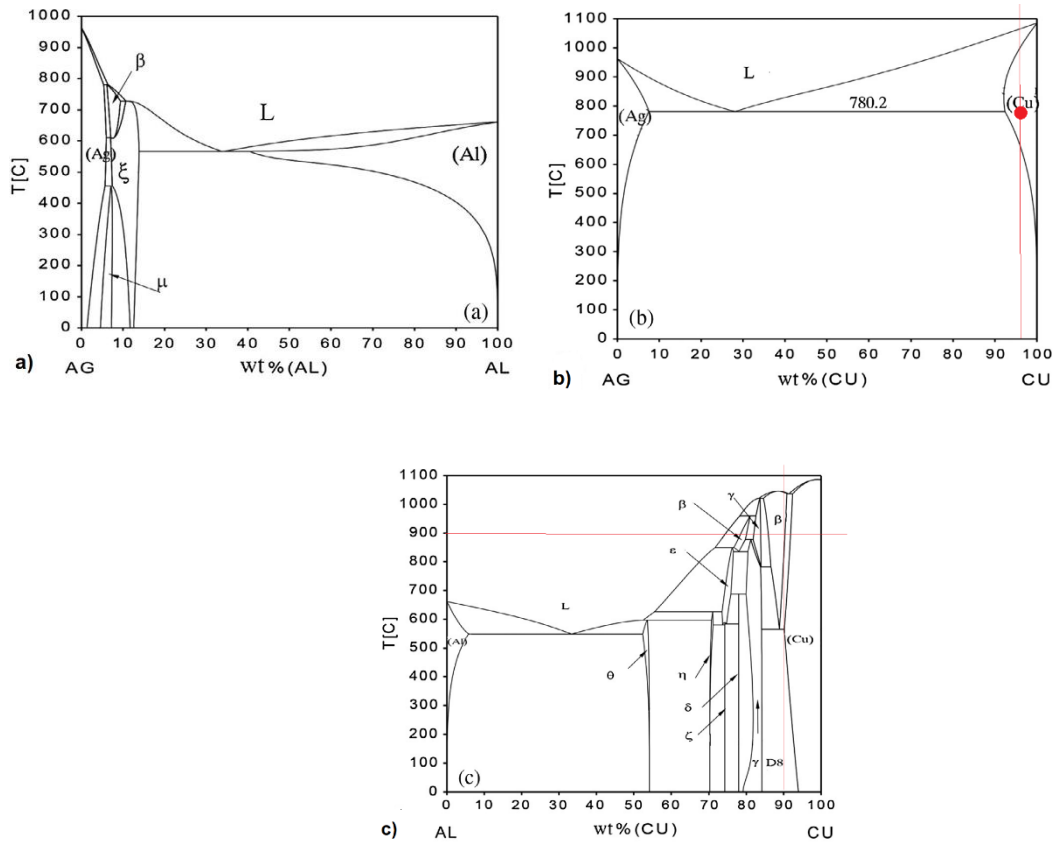


Figura. 3. Diagramas de fases binarios: (a) Ag – Al, (b) Ag – Cu, (c) Al – Cu<sup>10</sup>

Tabla 2. Fases consideradas del sistema ternario Ag-Al-Cu, sus datos cristalográficos y modelos termodinámicos. (ARÉVALO., 2007)

Phase	TD database name	Pearson symbol	Space Group	TD model
Liquid	LIQUID	-	-	(Ag, Al, Cu) <sub>1</sub>
(Ag) (Al) (Cu)	FCC_A1	cF4	Fm3m	(Ag, Al, Cu) <sub>1</sub> (Va) <sub>1</sub>
β	BCC_A2	cI2	Im3m	(Ag, Al, Cu, Va) <sub>1</sub> (Va) <sub>3</sub>
ξ	HCP_A3	hP2	P6 <sub>3</sub> /mmc	(Ag, Al, Cu) <sub>1</sub> (Va) <sub>0.5</sub>
μ	CUB_A13	cP20	P4 <sub>1</sub> /32	(Ag, Al, Cu) <sub>1</sub> (Va) <sub>1</sub>
θ	XZ2_C16	tI12	I4/mcm	(Ag, Al, Cu) <sub>1</sub> (Al) <sub>2</sub>
η	ALCU_ETA	mC20	C2/m	(Al, Cu) <sub>1</sub> (Ag, Cu) <sub>1</sub>
ζ	ALCU_ZETA	-	-	(Al) <sub>4</sub> (Ag, Cu) <sub>11</sub>
ε	ALCU_EPS	hP4	P6 <sub>3</sub> /mm	(Al, Cu) <sub>1</sub> (Cu) <sub>1</sub>
δ	ALCU_DEL	-	-	(Al) <sub>2</sub> (Cu) <sub>3</sub>
γD8	GAMMA_D83	cP52	P43m	(Al) <sub>4</sub> (Al, Cu) <sub>1</sub> (Ag, Cu) <sub>8</sub>
γ	GAMMA_H	-	-	(Al) <sub>4</sub> (Al, Cu) <sub>1</sub> (Ag, Cu) <sub>8</sub>

La aleación Cu-Al-Ag es un sistema en el cual se le pueden efectuar varios tratamientos térmicos y con estos modificar sus microestructuras y propiedades. Los tratamientos térmicos posibles que se pueden aplicar a este sistema son: recocidos, homogenizado, solubilizado-envejecimiento y betatizado (para transformación martensítica), cada uno de ellos con un propósito particular.

El propósito de este trabajo es hacer un estudio sobre el efecto de los tratamientos térmicos sobre las microestructuras de la aleación Cu-10%Al-3%Ag. Se harán pruebas de dureza para verificar los cambios en las propiedades. El estudio servirá

de base para ajustar las condiciones de deformación de esta aleación, los primeros estudios realizados en aleaciones binarias tales como Cu-Al, fueron a principios de los años 80, 1982 para ser exactos, en este caso se priorizo el tercer aleante el cual era el Berilio [Be], a medida que se fueron realizando pruebas se determina que esta aleación presenta propiedades con memoria de forma a temperatura inferiores a la temperatura de ambiente. Se determino que presenta buena estabilidad térmica en la aleación por debajo de los 300°C.<sup>3</sup>, trabajos previos han enfocado sus estudios en la disminución de la segregación de las aleaciones Cu-Al-Ag mediante tratamientos térmicos. A.T. Adorno y colaboradores estudiaron la influencia de las adiciones de plata desde 1.3 hasta 6.3 at. % en el comportamiento de envejecimiento de la aleación Cu-10.4 at. % Al, utilizando medidas de microdureza, microscopía electrónica de barrido (MEB) y energía dispersiva X- análisis de rayos (EDX). Los resultados indicaron que con adiciones de plata es posible obtener una respuesta al endurecimiento por envejecimiento, y que para tiempos de envejecimiento grandes hay una disminución en la dureza de la aleación, con un proceso que conduce a la segregación de Ag y Al.<sup>11</sup>

En los últimos años se han desarrollado nuevas aleaciones con memoria de forma (SMA), lo cual da pie a que dichas aleaciones presentan martensita, diversas fuentes citan que la aleación Cu-Al-Ag la cual se basa en un sistema binario Cu-Al posee temperaturas de transformación demasiado altas, sin embargo, esta aleación no se puede transformar termoelásticamente; la adición de Ag puede modificar la transformación martensítica, revelando una transformación termoelástica y posible efecto de memoria de forma, un requisito importante para la formación de martensita en el enfriamiento, es la previa homogeneización de la aleación, los granos monofásicos de fase  $\beta$  son un requisito primordial en aleaciones base cobre. En varios trabajos se han establecido las condiciones de tratamiento térmico para formar microestructuras martensíticas para las aleaciones Cu-Al-Ag. De manera general, las muestras se calientan a una temperatura alrededor de 900°C (donde está presente la fase  $\beta$  en el diagrama de fases), después de una permanencia entre 15 minutos, las probetas son enfriadas rápidamente en agua hirviendo aproximadamente 100°C por un lapso de 1 minuto, seguido de enfriamiento a temperatura ambiente. Para este sistema de aleación no hay registros visibles sobre tratamientos térmicos efectuados por tiempos largos de betatizado mayores de 15 minutos como los que se han manejado para los sistemas Cu-Al-Zn, Cu-Al-Zn-Ni. El tiempo de tratamiento térmico podría afectar la transformación martensítica.<sup>12</sup>

### 5.9 Ensayo de dureza

El ensayo de dureza Brinell tiene como finalidad estudiar la fuerza con la que aplica un

penetrador de duro de 1 1/6" generalmente de carburo de tungsteno sobre un metal, dependiendo el material a estudiar el indentador puede cambiar por uno de punta diamante para aceros, se utiliza cargas de 100 a 150 kg con una precarga de 10 kg, esta fuerza tiende a estar de 3 a 8 segundos, cuando se realiza un ensayo de dureza se debe considerar que la muestra no debe tener imperfecciones no haya ningún movimiento oscilación entre el metal e indentador. (ASTM, (1995).)

Para tener un mejor control en cuanto a la preparación de las metalografías nos basaremos en la norma *ASTM E3:Standard practice for preparation of metallographic specimens*. La cual como recomendación puntual es la limpieza de la muestra (contaminantes, polvo, grasas), dimensión de la probeta, en cuanto al tema del pulido y ataque nos indica que deberán estar calibrados los equipos. (Callister W. , (2009))

#### 5.10 Calorimetría

la calorimetría es una herramienta muy útil para caracterizar diversas transformaciones de fase, y ha sido ampliamente utilizada para analizar las transformaciones termoelástica martensíticas en aleaciones con memoria de forma (M., 2003). Sin embargo, debido a que el DSC convencional mide solo la suma de todos los eventos térmicos, siempre hay una combinación entre la sensibilidad y la resolución en casi todos los esquemas de diseño. de los calorímetros. Como resultado, algunas características importantes pueden ser ignoradas o los resultados son fácilmente malinterpretados en los casos que involucran transiciones débiles o transiciones complejas.

En todas las mediciones calorimétricas , el flujo de calor medido es el total de todas las respuestas térmicas, y de hecho es una combinación de dos componentes: (i) el flujo de calor inverso que depende de la capacidad calorífica y sigue directamente la velocidad de calentamiento instantánea (generalmente llamada componente termodinámico) y; ii) el flujo de calor no residual que depende de la velocidad de cualquier proceso impulsado cinéticamente y no sigue exactamente la velocidad de calentamiento instantánea (por lo tanto, denominado componente cinético). En el DSC convencional, la temperatura de la muestra generalmente se calienta o enfría linealmente a una velocidad constante y los signos de flujo de calor inverso y no inverso no se pueden separar (M., 2003)

## 6.- Metodología

La metodología estará dividida en diferentes etapas las cuales serán descritas de forma general, **A.- Obtención de la aleación, B.- Tratamientos térmicos, C.- Caracterización de la aleación, D.- Ensayo de calorimetría.**

### 6.1 Elaboración de la aleación.

Para la obtención de la fabricación de aleación se utilizará arena en verde debido a que su fácil manipulación y preparación. este proceso se llevó a cabo en el Instituto Politécnico Nacional, ubicada en Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”, en ESQIE: Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, edificio Dimm, debido a las facilidades que el personal de la institución nos brindó.

Para la preparación de la arena se agregó bentónica cálcica, bentonita sódica arena nueva, carbón marino, la suficiente para la preparación del molde, adicional agua para su compactamiento y aglutinamiento.



Figura 4. Tamizado de área en verde

- I. Para la preparación de arena en verde se agregó: arena y se dejó mezclar aproximadamente por un lapso de 25 segundos.
  - 57 Kg (aprox.) de arena negra
  - 15.5 Kg (aprox.) de arena nueva 50-60.
  - 3.8 Kg de “vulcabind / bentonita preparada”
- II. Se vierte agua en la mezcladora aprox. 3.4 L (+/- 200 ml) continuamente a un tiempo aproximado de 1.50 min de mezclado.

- III. Se agregó 2 Kg de carbón marino en un tiempo aproximado de 1.30 min de mezclado, también 2.66 Kg de Bentonita sódica y 1.14 Kg de bentonita cálcica y 3.8 Kg de “Vulcabind/bentonita preparada” a un tiempo de 1.20 min.



*Figura 5. Preparación de arena en verde en maquina convencional con rodillos marca ANTAI / ATHI, Mod. S11.*

Colocar sobre una mesa la caja del moldeo (adobera) con la placa del modelo entre el marco superior e inferior con la parte inferior hacia arriba para llenarla primero.



*Figura 6. Preparación de la caja de moldeo parte inferior.*

Colocación del harnero sobre la caja de moldeo, se agregó arena de careo sobre el harnero tamizando hasta que el nivel de arena cubre perfectamente toda la impresión del modelo tratando de cubrir cada espacio posible.



*Figura 7. Llenado de adobera colocando respirador.*



*Figura 8. Llenado de adobera con arena de relleno antes del apisonado.*

Después de retirar el harnero, adicionar arena de relleno al interior de la caja de moldeo hasta llenarla, distribuir y apisonar la arena uniformemente con apisonador neumático.



*Figura 9. Apisonado de arena en verde, marca: Lu Leir-Pure, Mod: SCIR-03*

Después de apisonar, agregar más arena de relleno hasta dejar la altura de la misma al ras del marco (enrasar). En algunos casos debe darse más altura a la caja (adobera) superior dependiendo de la pieza a fabricar.



*Figura 10. Enrasado de adobera.*

Voltear la caja de moldeo y posicionar los cargadores (alimentadores), repetir los pasos 3, 4, 5, respectivamente para llenar la parte superior del molde.



*Figura 11. Posicionamiento de cargadores y alimentadores*

Abrir la caja de moldeo separando la mitad superior de la inferior para extraer el modelo, así mismo realizar la salida de gases (aires) en la mitad superior del molde, redondear y aislar la colada.



*Figura 12. Extracción del modelo, creación de salida de gases.*



*Figura 13. Creación de salida de gases y canales de alimentación.*



*Figura 14. Modelo con alimentadores y guías.*



*Figura 15. Colada y aislamiento del molde.*

Sopletear las caras de ambas mitades para eliminar arena suelta, verificar el correcto cierre del molde colocando la mitad superior con la cara inferior y colocar una cama de arena para realizar el vaciado.



*Figura 16. Sopleteo del molde antes del vaciado*

Para fundir y obtener la aleación, se requiere un horno, en este caso utilizaremos uno de gas propano Mod: Spectra Overseas, como primer paso se seleccionará el tamaño y tipo de crisol, por esta ocasión se utilizará uno de grafito, este tipo de hornos alcanza temperaturas de hasta 1350°C.



*Figura 17. Material para fundir (cobre comercial, aluminio comercial 6061, plata 925, 92.5% pureza)*

Encendido el horno se precalentó el crisol, comenzando por añadir el Cobre puro de manera paulatina, aproximadamente 1.750 kg, tratando de que cubra toda la superficie interna del crisol, pasado 30 min, se verificó si el cobre empezó a fundirse, aproximadamente a una temperatura de 850°C, de lo contrario se utilizará una varilla para mover el metal dentro del crisol y ayudar a que este se funda de manera rápida.



*Figura 18. Pre calentamiento del crisol y cobre.*



*Figura 19. Generación de caldo (cobre), con apoyo de varilla.*

Ya que el cobre comienza a fundir (se vea un caldo) se añadió 200 gr de aluminio, si bien la temperatura de fusión del Cobre es superior a la del aluminio, este se debe añadir después y no antes evitando que el aluminio solidifique, es decir estaremos oscilando entre la temperatura de colada o vertido que es cientos de grados por encima de la temperatura de fusión del aluminio.



*Figura 20. Se agrega Aluminio al horno*

Ya por fundir el Cobre-Aluminio 1000°C, se añadió la plata 60 gr, se trató de mover el caldo dentro del crisol para ayudar a la aleación a que se mezcle de manera homogénea, se mueve hasta ver un color naranja dentro del crisol que da por

entendido que la aleación esta completa.

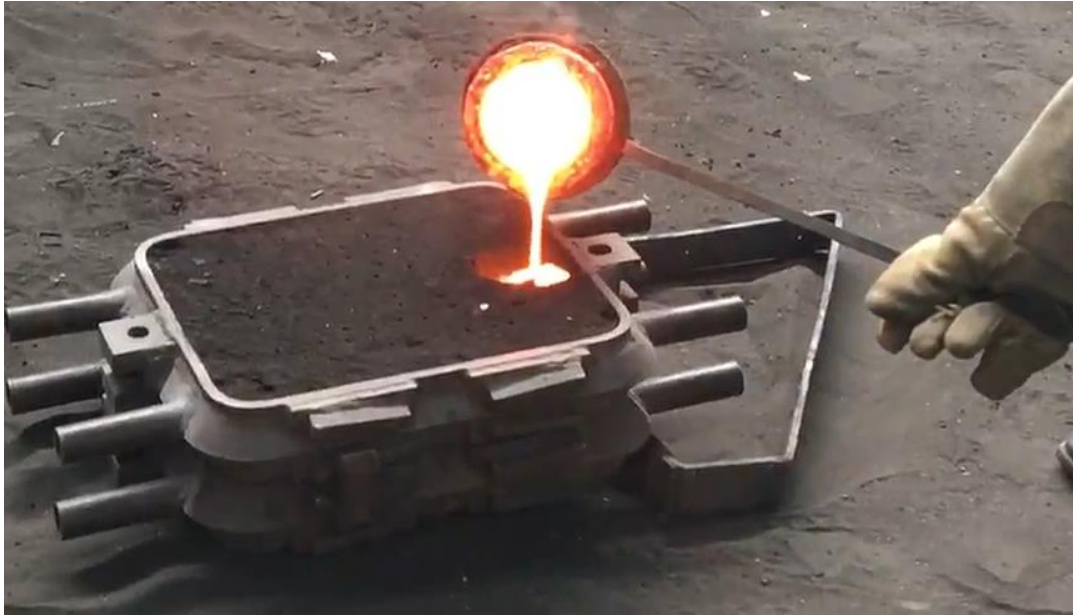


*Figura 21. Se vertió la plata y se movió constantemente.*

13.- Lista la aleación, con ayuda de unas pinzas (tenazas) se sacó de manera cuidadosa el crisol del horno, previamente preparado el molde se colocó para su vaciado, la distancia de vaciado entre colada y crisol es de 15 cm, evitando derramar metal, una vez vaciado el metal dentro del molde.



*Figura 22. Se sacó crisol de grafito del horno.*



*Figura 23. Proceso vaciado del metal.*

14.- Solidificada la aleación se dejó enfriar por un tiempo de 10 min, se desmoldeo el molde y se templó en agua a temperatura ambiente, para terminar el enfriamiento de la pieza; Se cortaron mediante una cortadora mecánica, diversos trozos de la aleación para la creación de probetas Cu-Al-Ag.



*Figura 24. Desmoldeo de placa Cu-Al-Ag.*

## 6.2 Tratamientos térmicos

Siguiendo con la metodología a continuación, se realizaron los tratamientos térmicos, la probeta número 1 es nuestra probeta testigo, como primer tratamiento se hizo el homogeneizado a muestra número 2, para las muestras 3-6 se realizó homogeneizado seguido de un betatizado y temple en agua hirviendo, mientras que para las muestras 7-9 se realizó un tratamiento de solubilizado seguido de un envejecimiento, terminando con recocido y normalizado a las muestras 10-11.

Se realizó los primeros tratamientos térmicos, en este caso se utilizaron hornos tipo mufla para realizar el homogeneizado a muestra 2 con temperatura de 200°C, por un tiempo de permanencia de 2 h y dejando enfriar al aire, posteriormente las muestras [3-6], se realizó el mismo tratamiento térmico homogeneizado a 200°C por un tiempo de 2 h.

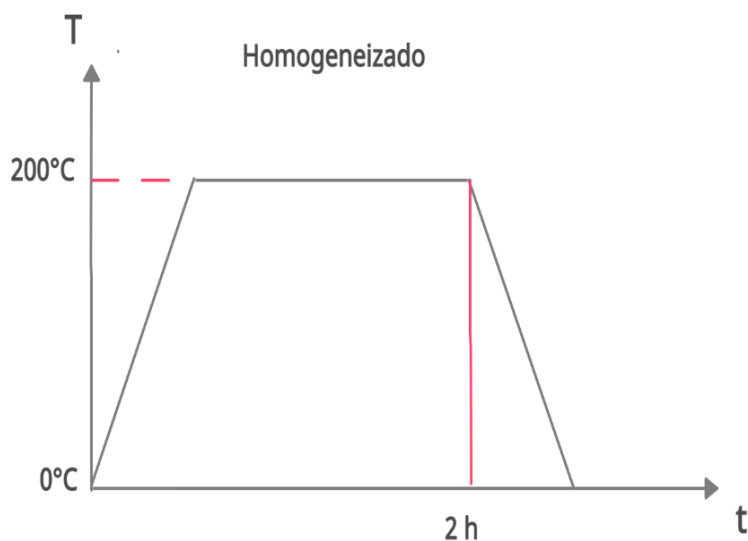


Figura 25. Diagrama tratamiento térmico Homogeneizado, muestras [2- 6]

Se realizó el tratamiento térmico de betatizado a 900°C por un tiempo de permanencia de 15 m, 30 m, 1h, 3h. respectivamente; continuando con temple a cada muestra en agua hirviendo.

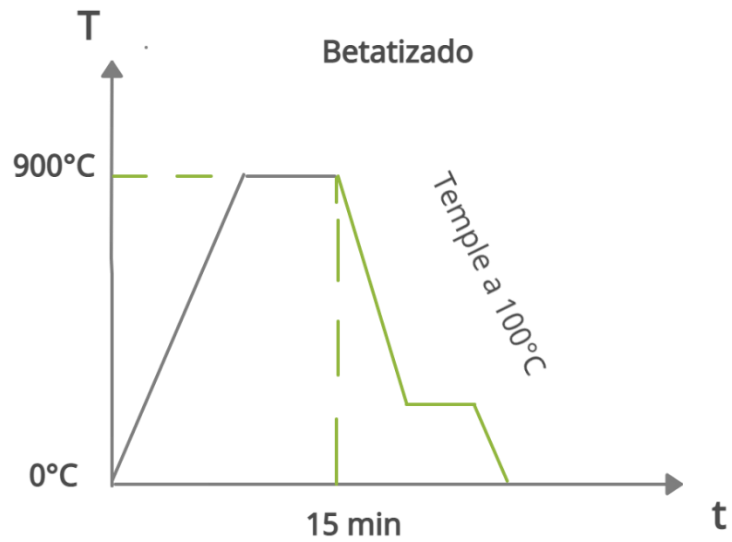


Figura 26. Diagrama tratamiento térmico Betatizado 900°C, 15 min, temple 100°C, muestra 3.

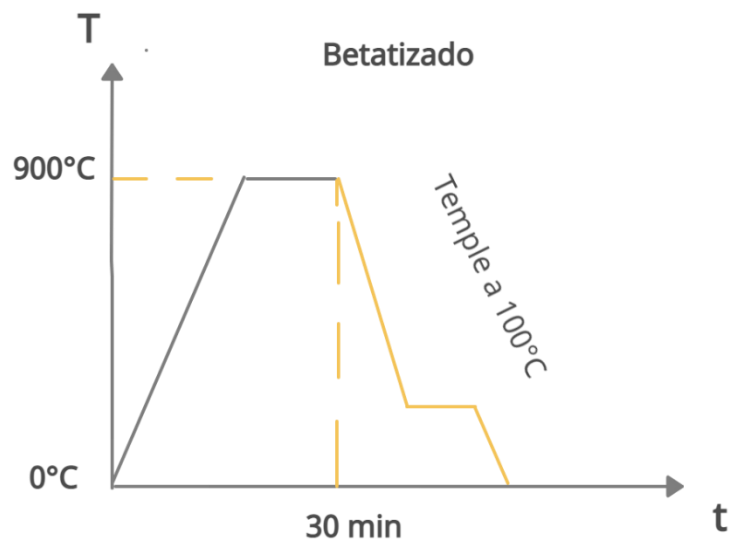


Figura 27. Diagrama tratamiento térmico Betatizado 900°C, 30 min, temple 100°C, muestra 4.

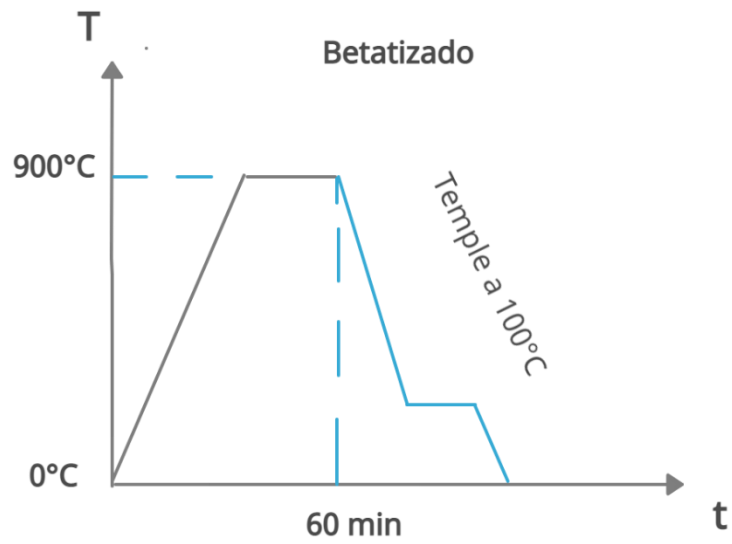


Figura 28. Diagrama tratamiento térmico Betatizado 900°C, 60 min, temple 100°C, muestra 5.

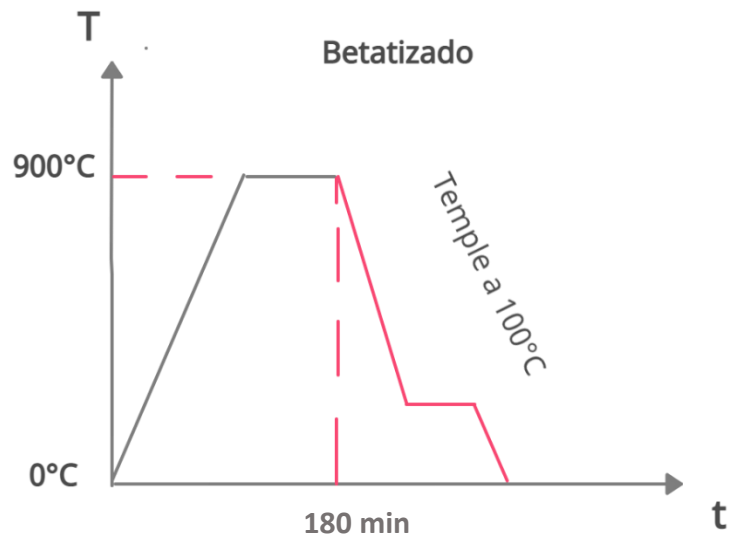


Figura 29. Diagrama tratamiento térmico Betatizado 900°C, 180 min, temple 100°C, muestra 6.

Continuando con los tratamientos térmicos, se realizó el solubilizado para las muestras [7-9] a una temperatura de 780°C obtenida del diagrama de fases con un tiempo de permanencia de 1 h, se dejó enfriar a temperatura ambiente para finalizar con un tratamiento térmico de envejecimiento a 450°C durante 2 h, 4h, 6h respectivamente y enfriadas en agua.

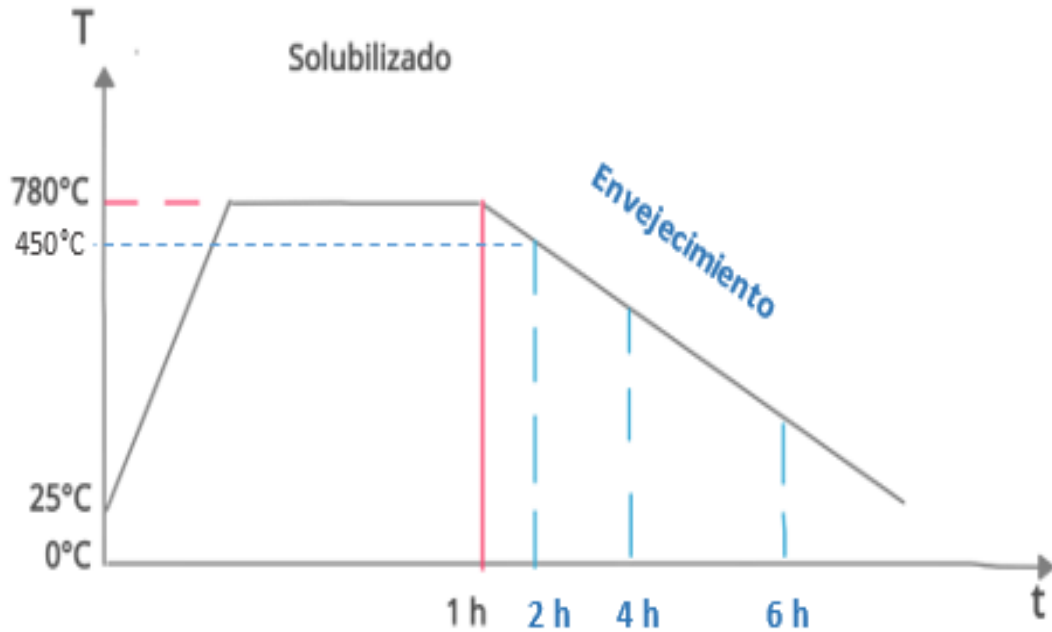


Figura 30. Diagrama tratamiento térmico Solubilizado 780°C, 60 min, muestras [7-9], envejecimiento 450°C, 2h,4h, 6h. muestras [7-9].

Por último, los tratamientos térmicos de normalizado y recocido a muestras [10-11] respectivamente a una temperatura de 900°C con un tiempo de permanencia de 1 h. el medio de enfriamiento para el normalizado fue al aire libre mientras que para el recocido dentro del horno.

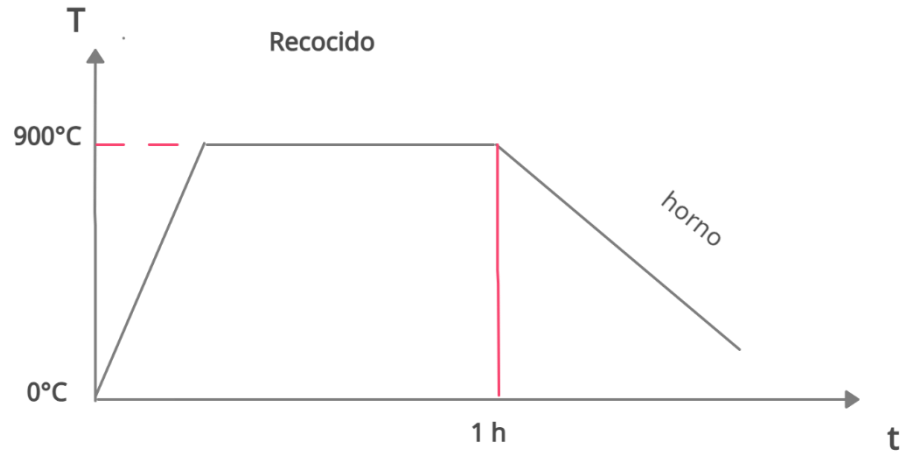


Figura 31. Diagrama tratamiento térmico normalizado 900°C, 60 min, enfriamiento al aire libre muestra 10.

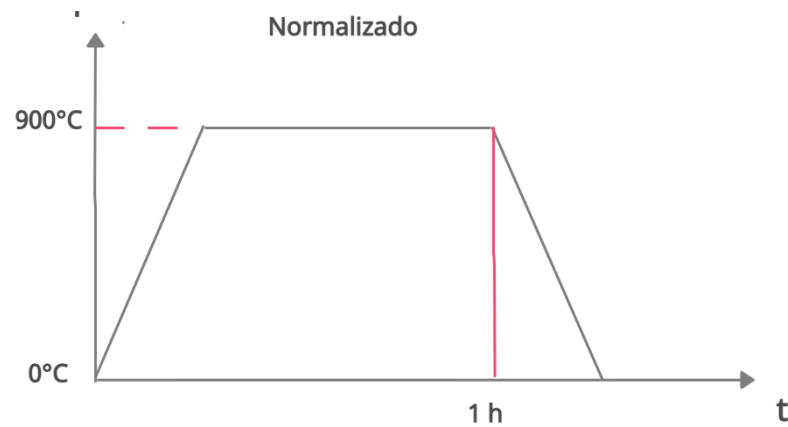


Figura 32. Diagrama tratamiento térmico recocido 900°C, 60 min, enfriamiento dentro del horno

*Tabla 3. Tratamientos térmicos (difusión)*

Tratamiento térmico	Temperatura	Tiempo de permanencia (h)
Homogeneizado	200°C	2
Solubilizado	780°C	1
Recocido	900°C	1
Normalizado	900°C	1
Envejecimiento	450°C	2, 4, 6

*Tabla 4. Tratamientos térmicos (desplazamiento)*

Tratamiento térmico	Temperatura	Tiempo de permanencia (min)
Betatizado	900°C	15
		30
		60
		180



*Figura 33. Horno tipo mufla utilizado para tratamientos térmicos*

### 6.3 Análisis Metalográfico

Se realizó el análisis metalográfico a las probetas con los tratamientos térmicos de deslizamiento y disolución, dicho análisis se realizó en el laboratorio de metalografía de Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco ubicado en el área de materiales, el análisis metalográfico se describe de la siguiente manera:

Selección de muestras para el montaje en baquelita con ayuda de Montadora marca: Inlay Machine Mod: XQ-2B



*Figura 34. Montadora Inlay Machine Mod: XQ-2B*

Proceso de lijado, se utilizó un banco de lijado marca: buehler utilizando lijas del número 80 a 600 marca fandeli hasta que se obtuvo una superficie plana y en una sola dirección.



*Figura 35. Banco de lijado marca: Buehler mod: S1*

Pulido, con apoyo de pulidora metalográfica marca: metaserv mod:250 utilizando alúmina del 0.5 y 0.3 $\mu$ m, paño y alcohol, montado el paño las revoluciones de giro del disco son de 250-300 con un tiempo de permanencia de entre 5 a 10 min buscando un acabado tipo espejo.



*Figura 36. Pulidora metalográfica marca: Buehler mod: metaserv 250*

Para el ataque químico, se utilizó: 95 ml de etanol  $C_2H_5OH$ , 2 gr de cloruro férrico  $FeCl_3$ , 2 ml de ácido clorhídrico  $HCl$ , agua y finalmente se secaron las probetas con ayuda de una pistola de calor, cada probeta se sometió a frotamiento con reactivo nos apoyamos de un trozo de algodón sumergiéndolo en dicho reactivo, frotando las probetas con un tiempo de permanencia de 7 segundos cada una, las probetas son llevadas directamente al microscopio metalográfico para determinar su microestructura y toma de micrografías.



*Figura 37. Preparación de reactivo Cu-Al-Ag*

Con apoyo del microscopio metalográfico marca: Optimus mod: pmg 3 y cámara se tomó las micrografías a 5x, 10x, 20x, 50x, para obtener una excelente metalografía, es recomendable hacer una correcta preparación de las probetas, procurando que la superficie este totalmente limpia sin ningún tipo de ralladuras y poder observar claramente la microestructura de las probetas atacadas químicamente, dicho proceso se repite para todas las probetas.



*Figura 38. Microscopio metalográfico marca: Optimus mod: PMG 3*

#### 6.4 Ensayo de dureza

Para el ensayo de dureza se tiene contemplado usar la escala Rockwell tanto por su facilidad para la determinación de la dureza del metal y debido a que es la más usada para aleaciones de cobre, sin mencionar que se pueden usar diferentes escalas debido a la combinación entre indentadores y carga.

Con el apoyo de un durómetro análogo marca: Mitutoyo mod: hr-100 se usó la escala Rockwell B con la cual se trabajó con una precarga de 10kg y carga total de 100 kg e indentador de esfera 1/16 pulgadas de carburo de tungsteno.

El análisis metalográfico se describe de la siguiente manera:

Se colocó el indentador de carburo de tungsteno

- I. Se fijó la carga de 100 kg esta carga será utilizada para las demás probetas, caso contrario se utilizará un indentador de cono de diamante y carga de 150 kg.
- II. Establecidos los parámetros, se colocó la probeta tratando de que no haya movimiento entre la base y probeta.
- III. Se aplicó la precarga de 10 kg, por un tiempo de permanencia de 3 segundos, donde el indentador hace contacto con la probeta, ya establecida la zona a medir, se aplicó la carga total con un tiempo de permanencia de 7 segundos.

- IV. Se liberó la precarga y se toma registro de la dureza, este proceso se repite para las probetas restantes.



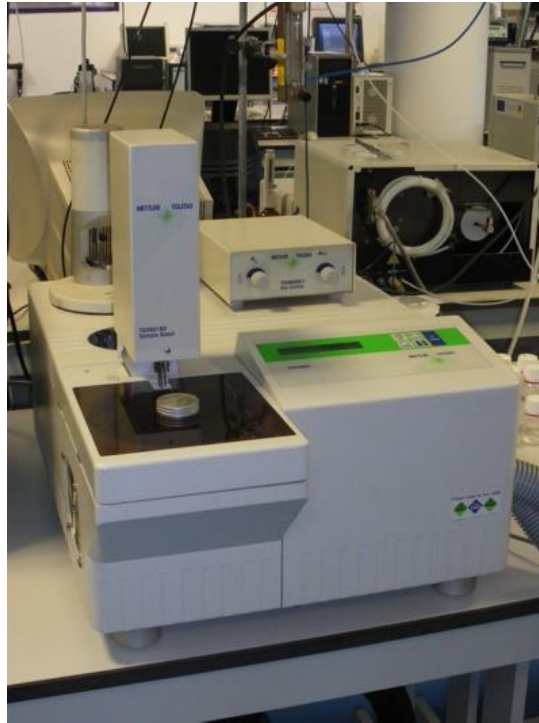
Figura 39. Reloj durómetro e indentación de probeta marca: Mitutoyo mod: HR-100

## 7.- Calorimetría

El calorímetro Mitutoyo mod: HR-100, se calibró para el constante celular, la pendiente basal y la lectura de temperatura utilizando una muestra estándar de indio de alta pureza, y la capacidad calorífica (Cp) fue calibrado con una muestra de zafiro estándar utilizando los mismos parámetros experimentales en la temperatura de interés.

- I. Las muestras se pesaron 2-5 gramos y se colocaron en sartenes de muestra al estándar con tapas.
- II. Se utilizó como referencia una bandeja de muestra vacía a juego con tapa engarzada, la velocidad de calentamiento/enfriamiento subyacente, la amplitud de modulación y el período de modulación son los tres parámetros experimentales importantes que afectan a los resultados de la medición.
- III. En los presentes experimentos, velocidad de calentamiento subyacente y velocidad de enfriamiento de 5 K/min, amplitud de modulación de 91K, y el período de modulación de 60 s.

- IV. Se utilizaron tanto en los escaneos de calefacción como de enfriamiento, en estas condiciones, la velocidad de calentamiento/enfriamiento instantáneo experimentada por las muestras varía entre 0 y 10 K/min.



*Figura 40. Calorímetro DSC (cartagena, s.f.)*

## 8.-Resultados

En este apartado se da a conocer los resultados de la caracterización de las probetas de una manera más detallada, estos resultados son tanto para muestras tratadas térmicamente como no tratadas, como primer plano, se observa las metalografías de las probetas que fueron atacadas químicamente.

Posteriormente se presentan los valores arrojados del ensayo de dureza Rockwell B para cada tratamiento térmico previamente hecho, para terminar, se presentan los gráficos de las pruebas hechas por medio del calorímetro, donde se observan las temperaturas de la transformación martensítica y austenítica.

### 8.1 Micrografías

En el siguiente apartado se describen las micrografías tratadas térmicamente y con ataque químico dando comienzo con: Tabla 5. Análisis metalográfico, probeta testigo

Tabla 5. Análisis metalográfico, probeta testigo


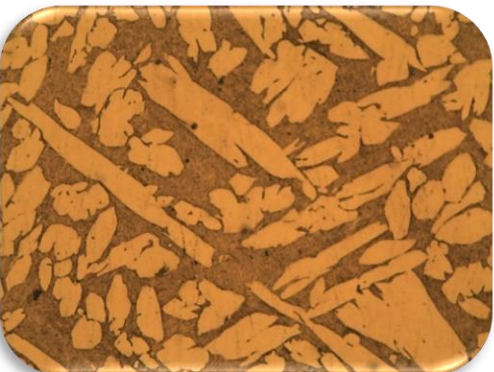
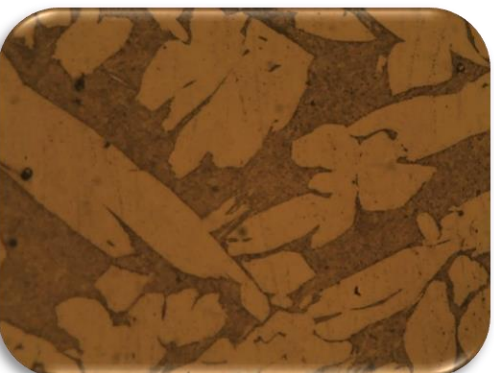
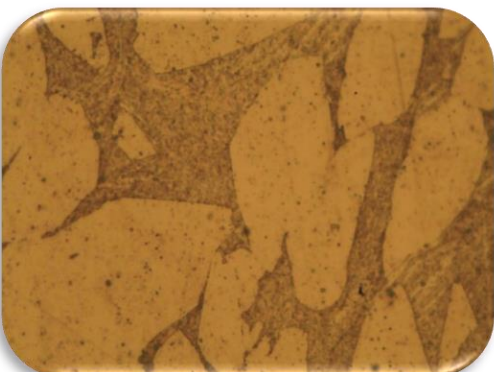
DESCRIPCIÓN	METALOGRAFÍA	ANÁLISIS
<p>Probeta <u>testigo</u> atacada químicamente con reactivo, aumento 5x</p>		<p>Se observa el grano definido en donde se muestra un tamaño de grano bastante grande lo que indica su dureza la cual es demasiado baja a comparación de las demás tratadas térmicamente.</p>
<p>Aumento 10x</p>		
<p>Aumento 20x</p>		
<p>Aumento 50x</p>		

Tabla 6. Análisis metalográfico, probeta homogeneizada

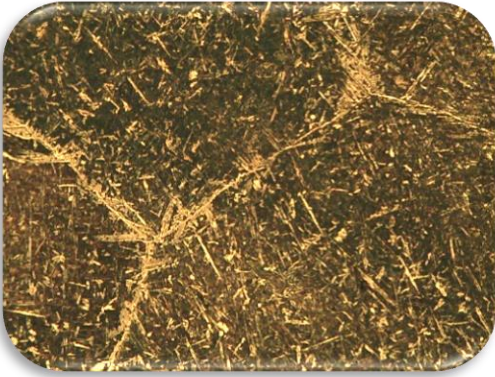
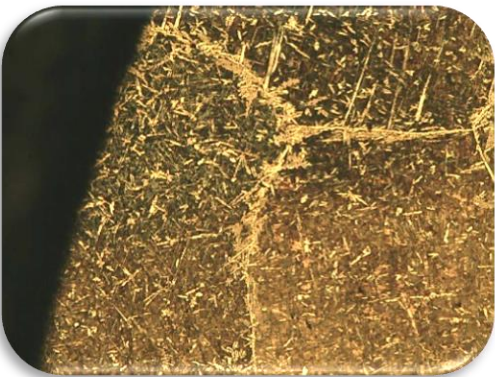
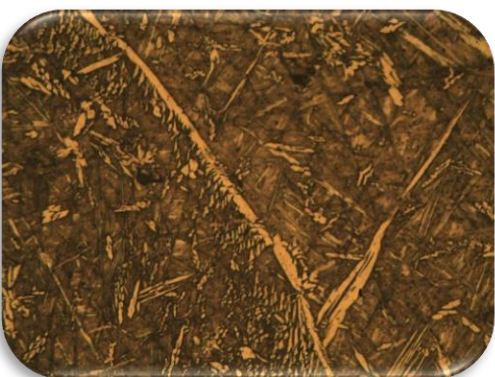
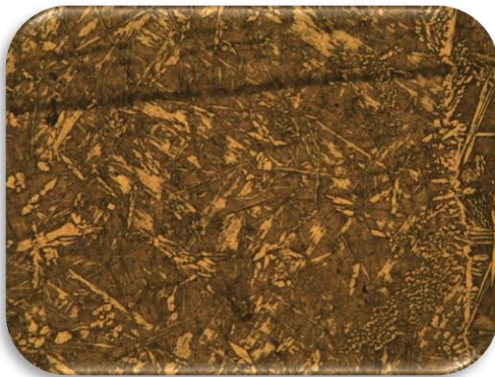
DESCRIPCIÓN	METALOGRAFÍA	ANÁLISIS
<p>Probeta con tratamiento térmico homogeneizado a 200°C, 2h aumento 5x.</p>		<p>Se observa el límite de grano y tamaño de grano homogéneo y fase alfa.</p>
<p>Aumento 10x</p>		<p>Se observa un crecimiento de otra fase en el límite de grano</p>
<p>Aumento 20x</p>		<p>Se observa granos columnares y una posible transformación martensítica debido al incremento de dureza con respecto a la probeta testigo.</p>
<p>Aumento 20x</p>		

Tabla 7. Análisis metalográfico, probeta betatizado 15 min.

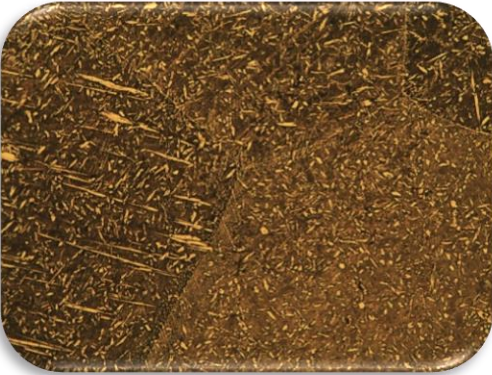
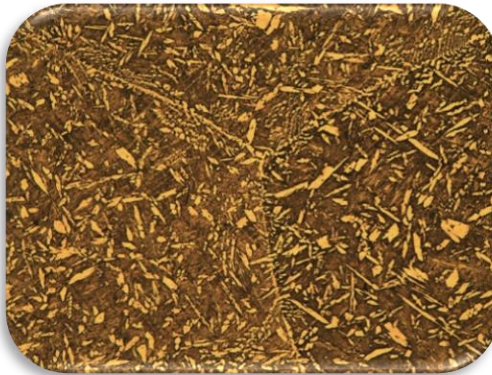
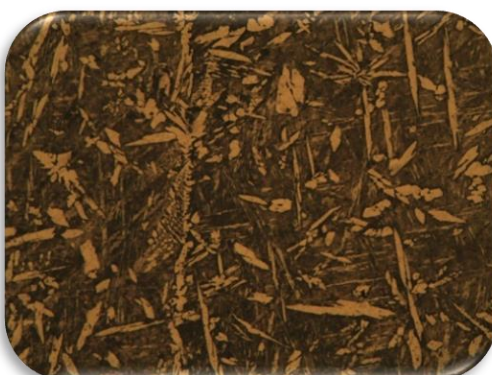
DESCRIPCIÓN	METALOGRAFÍA	ANÁLISIS
<p>Probeta con tratamiento térmico homogeneizado a 200°C, 2h y betatizado 900°C, 15 min.</p>		<p>Se observa una transformación martensítica, pequeñas agujas delgadas.</p>
<p>Aumento 10x</p>		<p>Podemos observar claramente el límite de grano, unos cuantos granos equiaxiales, granos laminares y mayor presencia de martensita.</p>
<p>Aumento 20x</p>		<p>Se muestra claramente martensita (agujas muy finas) y granos laminares</p>

Tabla 8. Análisis metalográfico, probeta betatizado 30 min.

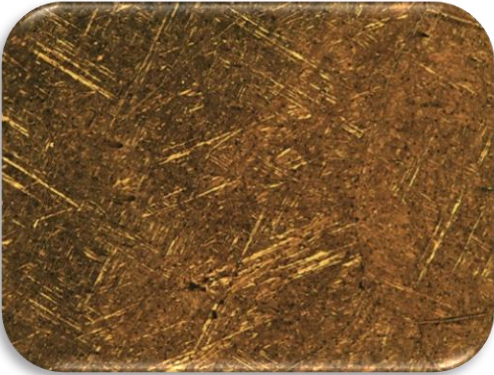
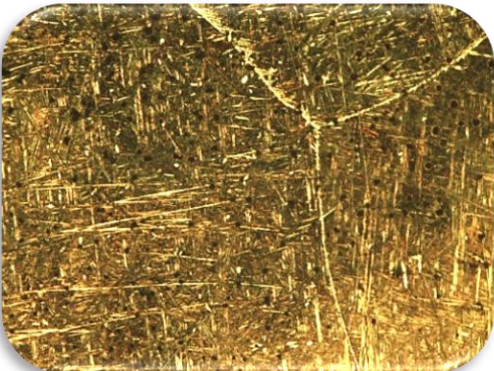
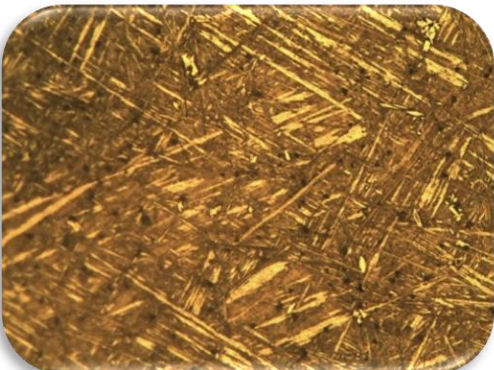
DESCRIPCIÓN	METALOGRAFÍA	ANÁLISIS
<p>Probeta con tratamiento térmico homogeneizado a 200°C, 2h y betatizado 900°C, 30 min.</p>		<p>Se observa martensita en mayor proporción, así mismo pequeños puntos negro que son porosidades.</p>
<p>Aumento 10x</p>		<p>Podemos observar el límite de grano y la presencia de martensita en mayor proporción con respecto a la probeta de 15 min.</p>
<p>Aumento 20x</p>		<p>Podemos notar presencia de martensita en varias direcciones a su vez, granos laminares-</p>

Tabla 9. Análisis metalográfico, probeta betatizado 1 h.


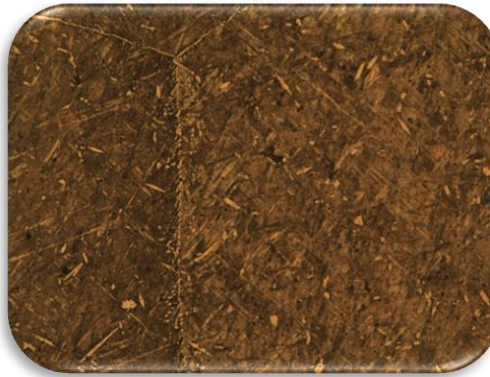
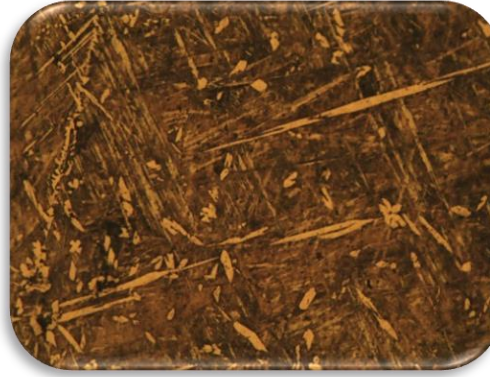

DESCRIPCIÓN	METALOGRAFÍA	ANÁLISIS
<p>Probeta con tratamiento térmico homogeneizado a 200°C, 2h y betatizado 900°C, 1 h.</p>		<p>Podemos observar el límite de grano, presencia de porosidad y martensita.</p>
<p>Aumento 10x</p>		<p>En el límite de grano tenemos presencia de granos equiaxiales, laminares y martensita en mayor proporción.</p>
<p>Aumento 20x</p>		<p>Tenemos presencia de martensita, las manchas en el límite de frontera de grano se deben a un posible "sobre ataque" para revelar la microestructura.</p>
<p>Aumento 50x</p>		<p>A simple vista tenemos granos laminares y en mayor proporción martensita.</p>

Tabla 10. Análisis metalográfico, probeta betatizado 3 h.

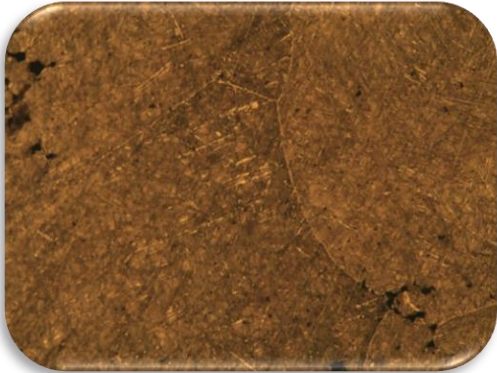
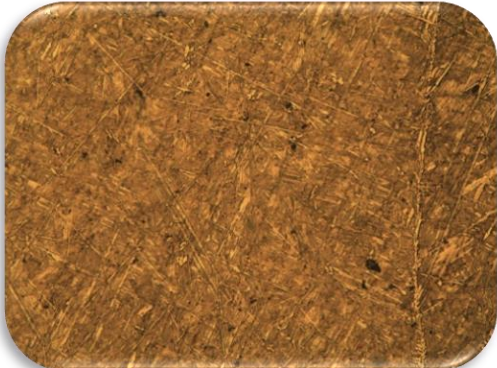
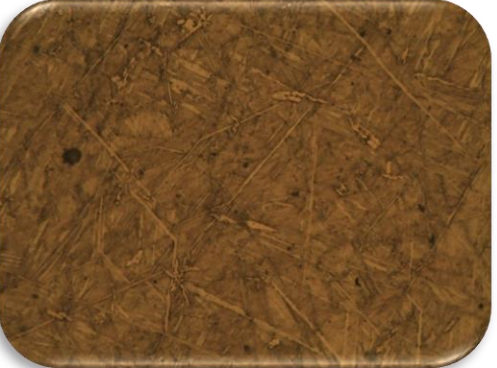
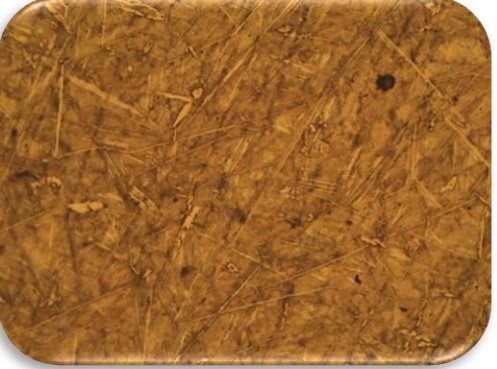
DESCRIPCIÓN	METALOGRAFÍA	ANÁLISIS
<p>Probeta con tratamiento térmico homogeneizado a 200°C, 2h y betatizado 900°C, 3 h.</p>		<p>Podemos observar una mayor cantidad de martensita, tamaño de grano más homogéneo y de menor tamaño</p>
<p>Aumento 10x</p>		<p>La mayor parte de la microestructura tiene presencia de grano laminar y martensita hasta el punto de parecer agujas delgadas en toda la probeta.</p>
<p>Aumento 20x</p>		<p>Se muestra uno que otro grano equiaxiales, pero en su mayoría son granos laminares y martensita.</p>
<p>Aumento 20x</p>		<p>Se muestra uno que otro grano equiaxiales, pero en su mayoría son granos laminares y martensita.</p>

Tabla 11. Análisis metalográfico, probeta solubilizada + envejecimiento 2 h.

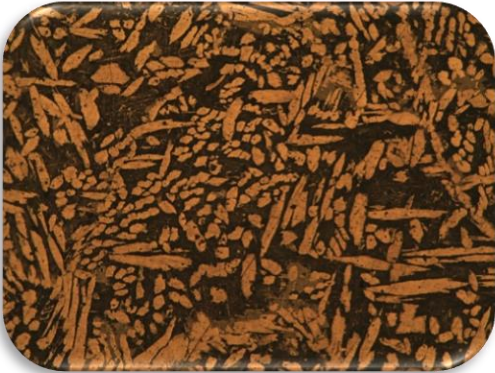
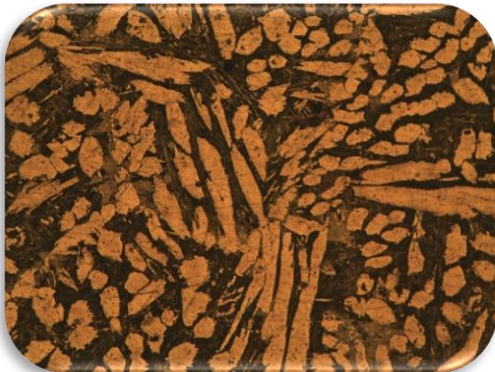
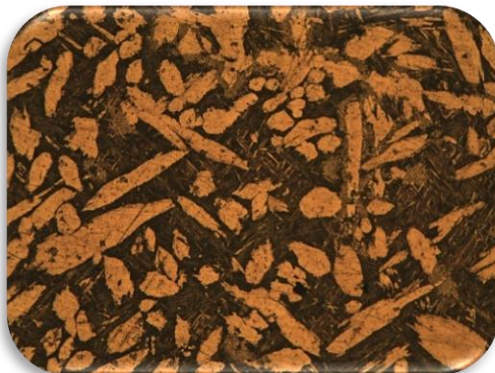

DESCRIPCIÓN	METALOGRAFÍA	ANÁLISIS
<p>Probeta con tratamiento térmico Solubilizado a 780°C, 1h y envejecimiento a 450°C, 2 h. aumento 5x</p>		<p>Se observa presencia de granos equiaxiales debido al sobre enfriamiento.</p>
<p>Aumento 10x</p>		<p>Debido al crecimiento de nuevos granos, se observa una presencia de granos laminares.</p>
<p>Aumento 10x</p>		<p>Otra imagen con las similares condiciones, sin embargo, se observa la posible presencia martensita en la parte interna.</p>
<p>Aumento 20x</p>		<p>Al incrementar el aumento se observa que efectivamente tenemos posible presencia de fase martensítica.</p>

Tabla 12. Análisis metalográfico, probeta solubilizada + envejecimiento 4 h.

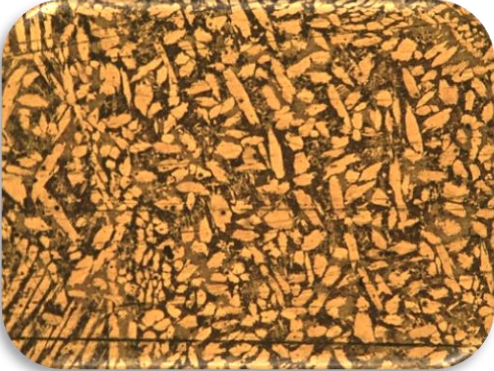
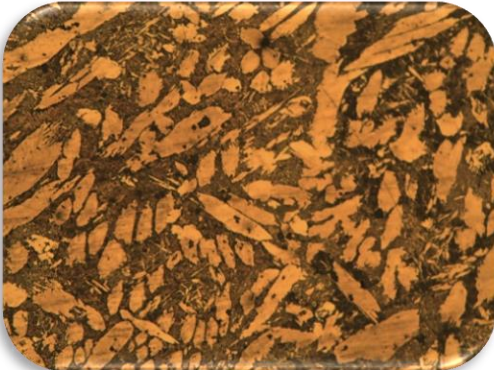

DESCRIPCIÓN	METALOGRAFÍA	ANÁLISIS
<p>Probeta con tratamiento térmico Solubilizado a 780°C, 1h y envejecimiento a 450°C, 4 h. aumento 5x</p>		<p>Se muestra una distribución de granos más homogéneos un tanto equiaxiales</p>
<p>Aumento 10x</p>		<p>Podemos observar un crecimiento de una nueva fase, alfa a beta en el límite de grano y presencia de martensita</p>
<p>Aumento 10x</p>		

Tabla 13. Análisis metalográfico, probeta solubilizada + envejecimiento 6 h.

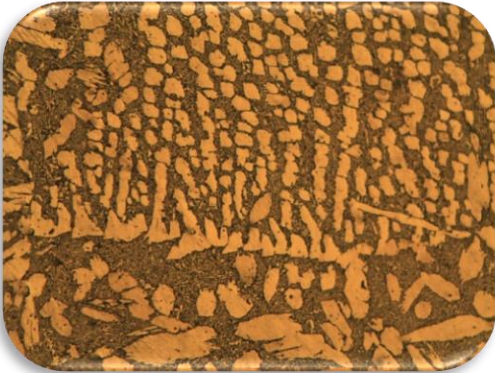

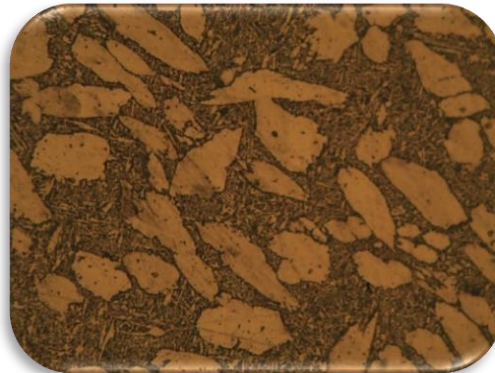
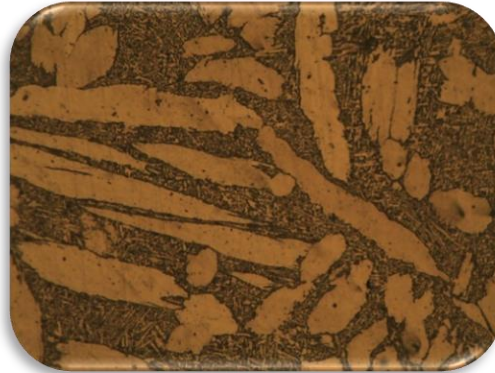
DESCRIPCIÓN	METALOGRAFÍA	ANÁLISIS
<p>Probeta con tratamiento térmico Solubilizado a 780°C, 1h y envejecimiento a 450°C, 6 h. aumento 5x</p>		<p>Se observa gran cantidad de granos equiaxiales en su mayoría en el límite de grano</p>
<p>Aumento 10x</p>		<p>Podemos notar presencia de otra fase en la parte interna puede ser una combinación entre alfa y beta</p>
<p>Aumento 10x</p>		<p>Con un mayor aumento se observa que hay una fase la cual presuntamente podría ser martensita debido a que asemeja las agujas finas</p>
<p>Aumento 10x</p>		<p>Con un mayor aumento se observa que hay una fase la cual presuntamente podría ser martensita debido a que asemeja las agujas finas</p>

Tabla 14. Análisis metalográfico, probeta normalizada

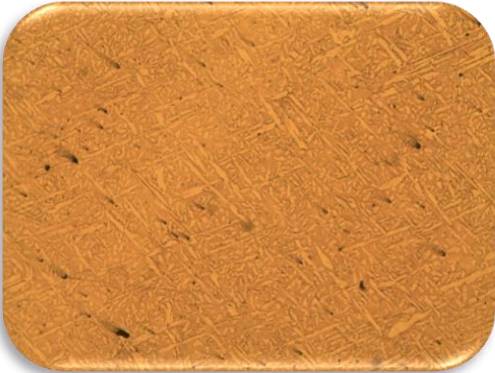
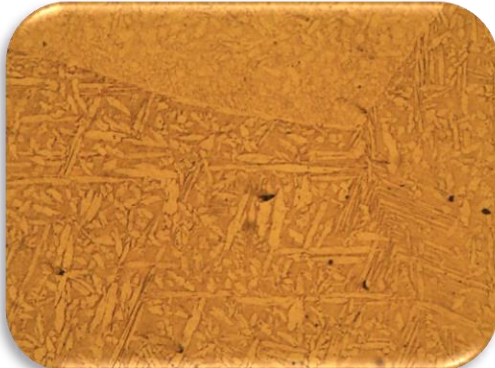
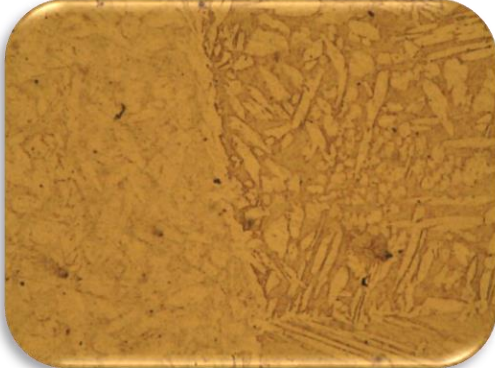
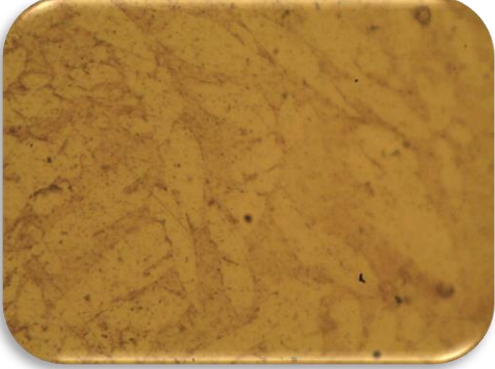

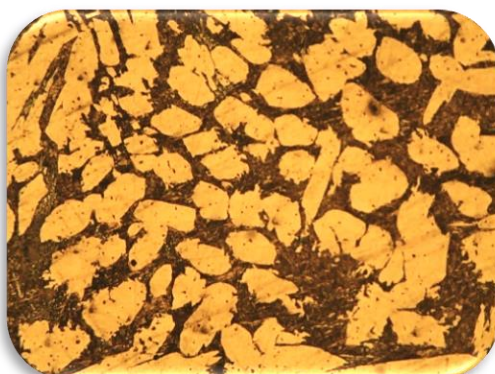
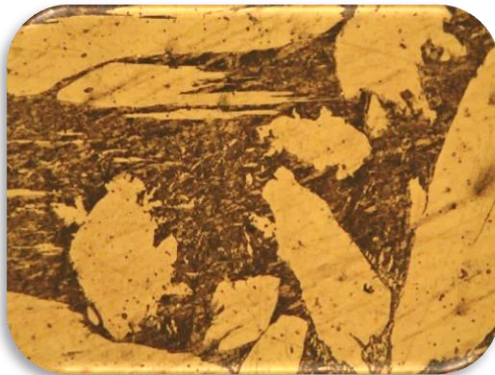
DESCRIPCIÓN	METALOGRAFÍA	ANÁLISIS
<p>Probeta con tratamiento térmico Normalizado a 900°C, 1h, enfriamiento a temperatura ambiente, aumento 5x</p>		<p>Para los últimos tratamientos observamos que hay presencia de granos laminares y fase beta, los puntos negros son porosidades</p>
<p>Aumento 10x</p>		<p>Observamos perfectamente el límite de grano, granos laminares y fase beta, casi por completo</p>
<p>Aumento 10x</p>		<p>En el límite de grano se observa un crecimiento de una nueva fase, justo antes de llegar a beta.</p>
<p>Aumento 20x</p>		<p>Se observa unos granos más largos y definidos.</p>

Tabla 15. Análisis metalográfico, probeta recocida

DESCRIPCIÓN	METALOGRAFÍA	ANÁLISIS
<p>Probeta con tratamiento térmico Recocido a 900°C, 1h, enfriamiento a dentro del horno, aumento 5x.</p>		<p>Podemos notar un incremento de tamaño de grano debido al tratamiento térmico, también granos equiaxiales</p>
<p>Aumento 10x</p>		<p>A mayores incrementos se observa una fase adicional, podría ser una combinación entre beta y alfa.</p>
<p>Aumento 20x</p>		<p>Se puede observar granos bastante grandes, sin embargo, hay otra fase, podría ser beta y una fase nueva.</p>

## 8.2 Valores ensayo de dureza

Tabla 16. Durezas de las probetas tratadas térmicamente, HRB

No. Mediciones	HRB						
	Colada	Testigo + AQ	Sol + Env [2h]	Sol + Env [4h]	Sol + Env [6h]	Recocido [1h]	Normalizado [1h]
1	64	63	85	86	91	65	82
2	66	61	85.5	88	90.5	64	82.5
3	64.5	64	87	88.5	92	64	79
4	63.5	65	86.5	87	93	55	90
5	68	60	85	89	91	67	82.5
6	63	62	84	88.5	90.5	67	83
7	65	62.5	85.5	87.5	90	57	80
8	67	62.5	86	87	91	58	82.5
9	65	67	88	88	90.5	68	83
10	66	63	87	87.5	90	67	82
<b>PROMEDIO</b>	<b>65.2</b>	<b>63</b>	<b>85.95</b>	<b>87.7</b>	<b>90.95</b>	<b>63.2</b>	<b>82.65</b>

Tabla 17. Durezas de las probetas tratadas térmicamente, HRC

No. Mediciones	HRC				
	Homogeneizado	Betatzado [15m]	Betatzado [30m]	Betatzado [1h]	Betatzado [3h]
1	20	22	25	25	29
2	21	22	25.5	27	30
3	20.5	20	26	27	29.5
4	22	22	26	25	29
5	20.5	23	26	27	28
6	19.5	19	24	26.5	29
7	20	20	25	27	29.5
8	21	22	24	25	29.6
9	20	21	24.5	26	29.4
10	21.5	20.5	24	25	30
<b>PROMEDIO</b>	<b>20.6</b>	<b>21.15</b>	<b>25</b>	<b>26.05</b>	<b>29.3</b>

### 8.3 Valores Ensayo calorimetría

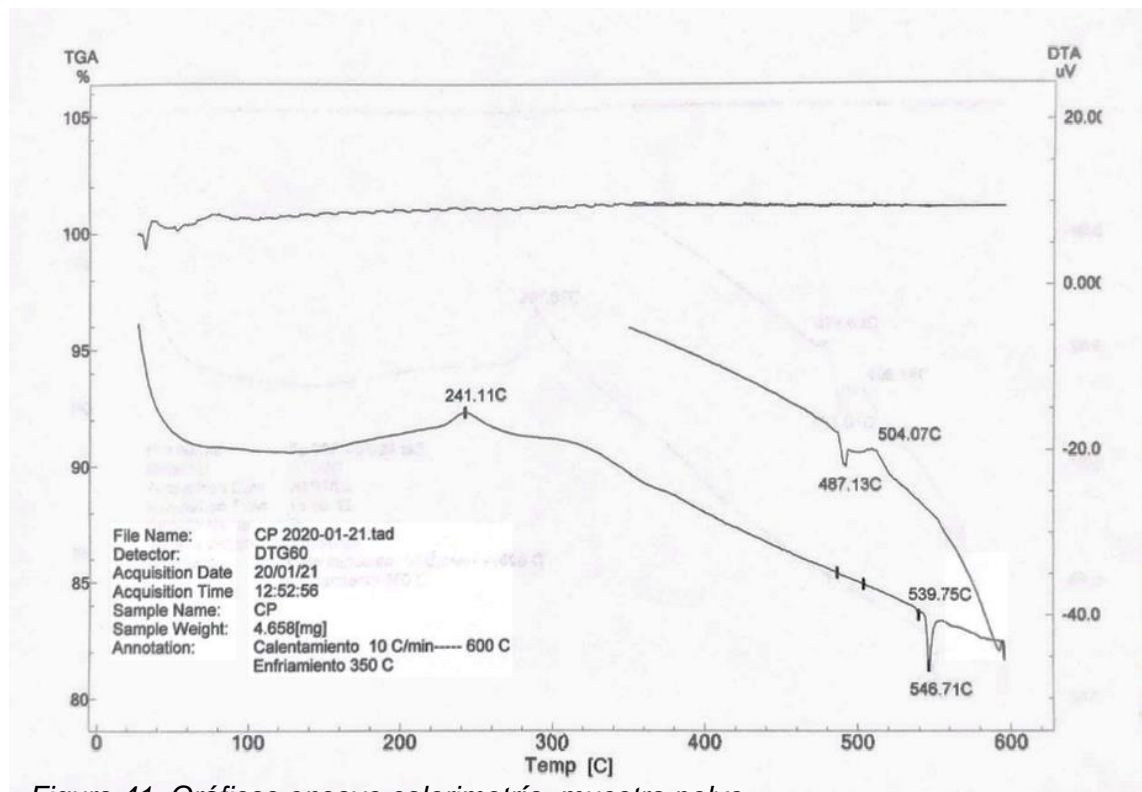


Figura 41. Gráficas ensayo calorimetría, muestra polvo.

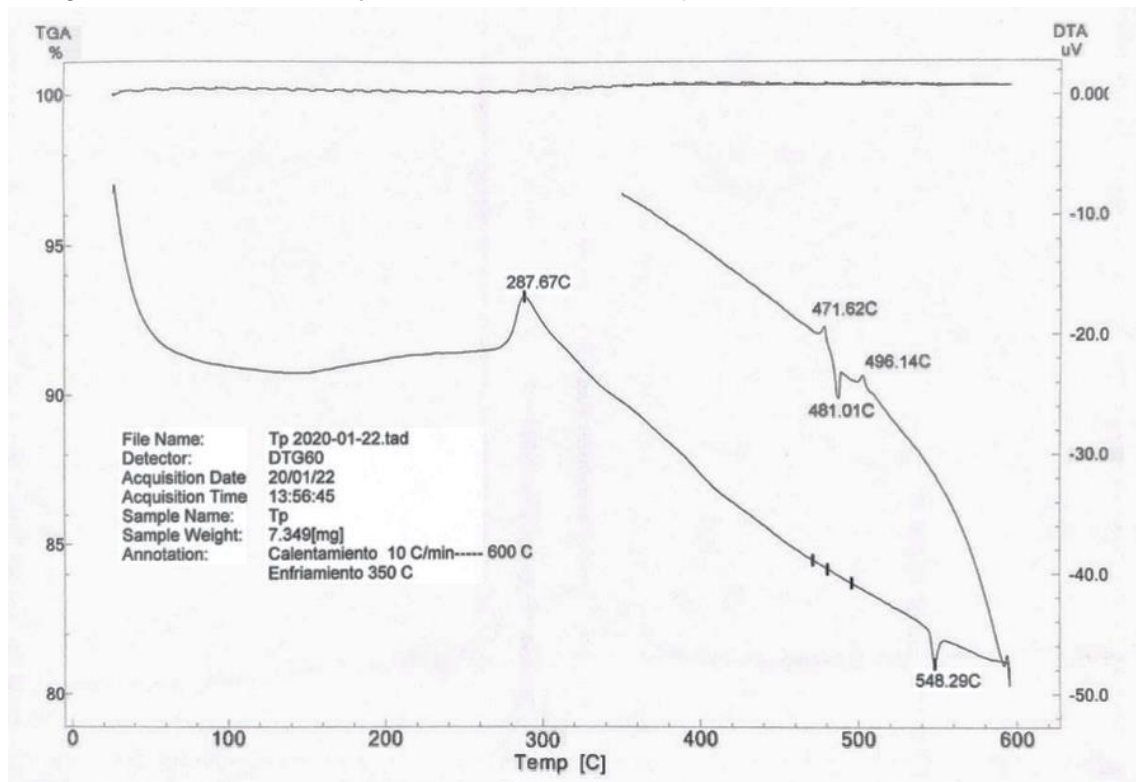
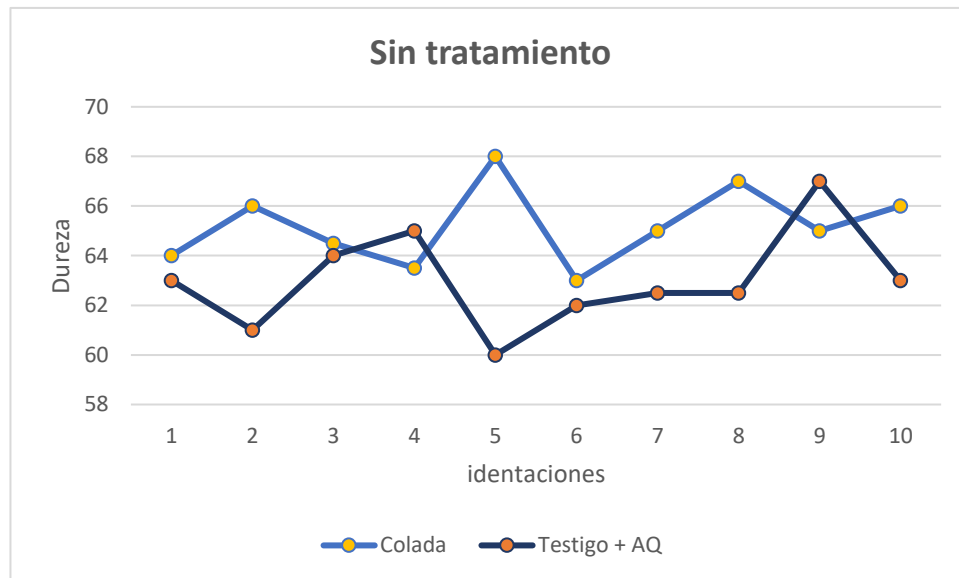


Figura 42. Gráfica ensayo calorimetría, muestra [3x3 mm]

### 9.- Análisis de resultados

En la *figura 43* podemos observar la comparación que hay entre la probeta de colada con respecto a la testigo atacada químicamente, hablando en términos de dureza no presenta cambio alguno, ya que esta se mantiene casi igual, lo que significa que el ataque químico solo ayuda en la micrografía.



*Figura 43. Gráficas ensayo de dureza sin tratamiento.*

Podemos observar que a medida que el tiempo del tratamiento térmico de envejecimiento va en aumento su dureza aumenta considerablemente lo que se trató de buscar con el solubilizado fue mantener la aleación a una temperatura de 780°C por un tiempo de 1 h para que demás componentes entren en la solución y posteriormente enfriarla de manera rápida.

Comparando las mediciones de la *Figura 44* a simple vista tenemos un incremento de dureza muy notable, el tamaño de los precipitados está en función de la temperatura y el tiempo de permanencia, a mayor temperatura y tiempo de permanencia los precipitados crecen lo cual se debe evitar, dichos precipitados que endurecen al material se pueden encontrar a temperatura ambiente “envejecimiento natural” mientras que si elevamos la temperatura se denomina “envejecimiento artificial”

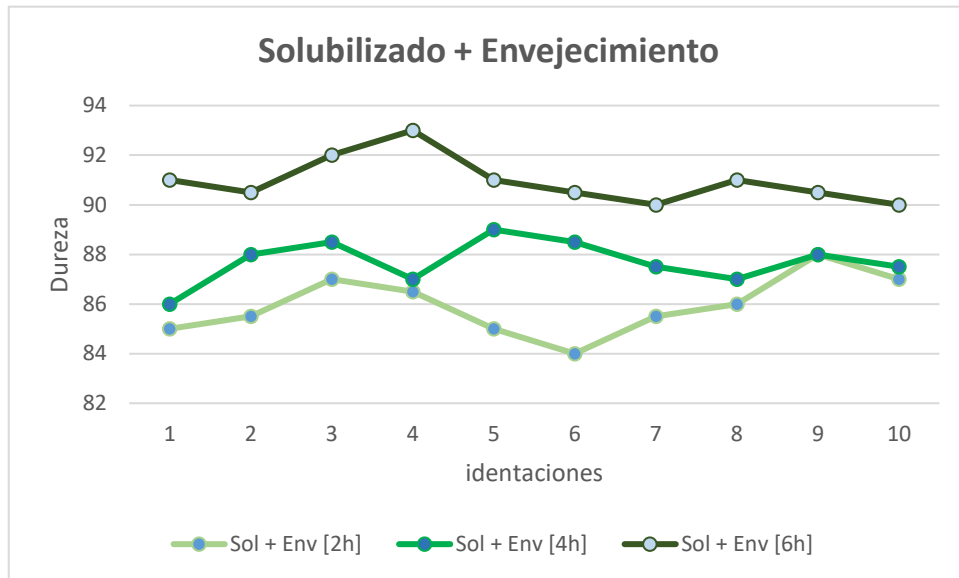


Figura 44. Gráficas ensayo de dureza solubilizado + envejecimiento

Al aplicar el tratamiento térmico de recocido se muestra que la dureza disminuye de manera drástica debido a que en comparación con la *Figura 45*, ya que este tratamiento libera esfuerzos internos regenerando la estructura, aumentando la ductilidad del material sin que se presente un cambio de fase como se observa en *Tabla 15. Análisis metalográfico, probeta recocida*. posteriormente, se observó un crecimiento de grano y la presencia de una nucleación entre los límites de granos.

Al realizar el normalizado que consiste en calentar por arriba de la temperatura crítica superior, se buscó generar una estructura más fina y homogénea, teniendo un aumento de dureza nuevamente con respecto al recocido y testigo, su dureza dependerá de la velocidad de enfriamiento con la que se dejará enfriando el material.

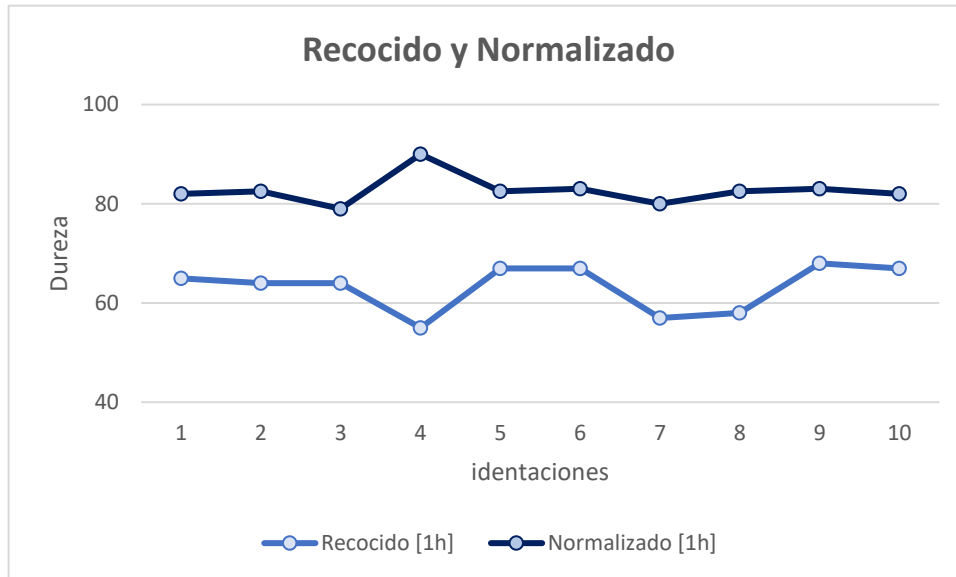


Figura 45. Gráficas ensayo de dureza recocido y normalizado.

En la Figura 46. Gráficas ensayo de dureza Homogeneizado y betatizado. Se observa un incremento considerable de la dureza con respecto a las probetas sin tratamientos térmicos, Al realizar el betatizado la dureza cambia esto debido a que alcanzamos a estabilizar la fase martensítica por medio del temple, como se observa en la gráfica Figura 46. Gráficas ensayo de dureza Homogeneizado y betatizado la dureza dependerá del tiempo de permanencia que dicha probeta se mantenga en el horno y enfriamiento, utilizar agua caliente 100°C aproximadamente logramos obtener martensita que se ve reflejada en la dureza del material, Figura 46. Gráficas ensayo de dureza Homogeneizado y betatizado. Al no poder medir la dureza en escala HRB debido al incremento sustancial se mide la dureza en escala HRC, teniendo durezas similares a las de un acero blando, se muestra que el betatizado a 3h presentó la mayor dureza de todas las probetas y de todos los tratamientos térmicos

A diferencia del betatizado el normalizado regenera la estructura a estado normal, libre de tensiones, sin embargo, se aumentó la dureza y la resistencia al desgaste, esto se observa en su dureza reportada ya que es similar a la del betatizado de igual manera se utilizó la escala HRC.

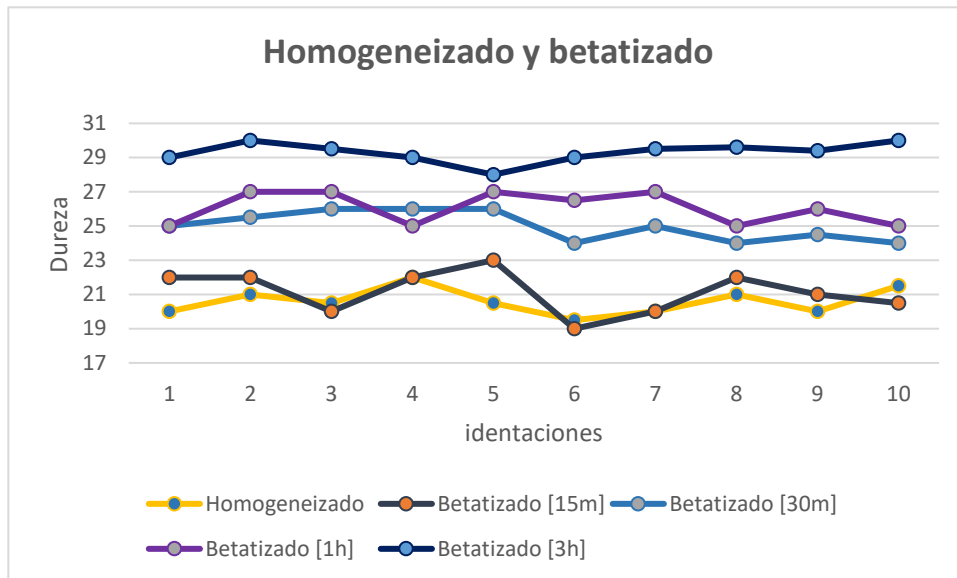


Figura 46. Gráficas ensayo de dureza Homogeneizado y betatizado.

Al homogeneizar las probetas se obtuvieron durezas similares al betatizado esto debido al sobre enfriamiento en el límite de grano, al tener una estructura similar a granos equiaxiales al tener un cambio de temperatura y composición ocurre un crecimiento de granos columnares, se observa que los granos son más homogéneos en cuanto el tamaño de grano, de acuerdo con la Fig. 2. Diagramas de fases binarios: (a) Ag – Al, (b) Ag – Cu, (c) Al – Cu, se puede notar que a la temperatura de 900°C tenemos la fase beta al 100% para posteriormente al enfriar se obtenga beta + alfa u otra fase.

Observando las probetas tratadas térmicamente con el betatizado se observó que se alcanzó la fase beta metaestable y al templar se congela la fase beta, claramente se encontró un incremento de dureza con respecto a la probeta testigo, este incremento fue de casi el doble, ya que la dureza oscilaba entre 20-30 HRC, se cambió de indentador por uno de punta diamante para poder medir su dureza, al incrementar el tiempo de permanencia de las probeta dentro del horno de 15 min con un valor de dureza de 20 HRC a 3 h con un valor de 30 HRC, se pudo notar un incremento de 10 unidades en escala HRC esto se vio reflejado en las microestructuras, a medida que el tiempo aumentaba la formación de martensita incrementaba y por consecuencia su dureza también.

Para el tratamiento de solución y envejecido notamos que si elevamos la temperatura por arriba de la línea de sólidos podemos generar un sobre calentamiento, de acuerdo con la Fig. 2. Diagramas de fases binarios: (a) Ag – Al, (b) Ag – Cu, (c) Al – Cu no ayuda a evitar la fusión de componentes en nuestro límite de grano lo cual nos genera un resultado no deseado en la ductilidad y propiedades mecánicas, otro punto a tener en cuenta es no elevar la temperatura por arriba de la línea eutéctica lo que genera

precipitados más grandes que pueden llegar a quebrarse y provoquen defectos en la microestructura, por otro lado si la temperatura de enfriamiento era demasiado rápida se genera una inestabilidad elástica en la microestructura, sin embargo, si esta es demasiado lenta se comenzarán a precipitar elementos en la aleación principalmente en el límite de grano, lo cual tratamos de evitar.

Para las probetas de normalizado buscando una liberación de esfuerzos obteniendo una estructura estable se realizó un normalizado, se determinó que la dureza de la aleación es de 80 HRB en comparación con la probeta de colada hubo un aumento de 15 unidades, por consiguiente, notamos la presencia de una fase creciente en el límite de grano y granos laminares beta, teta o alfa.

Por último, para las probetas que se les realizó recocido se observa una disminución de dureza de 60 HRB en comparación con la probeta de colada y testigo su dureza es mucho menor lo cual provoca una mejora en su maquinabilidad

Con base al ensayo de calorimetría mostrado en la *Figura 41*. Gráficas ensayo calorimetría, muestra polvo. se observa que la temperatura a la cual empieza la transformación martensítica en la muestra es a 548.7°C proveniente de la fase austenítica y esta termina a los 241.1°C, a su vez se tomó otra muestra, *Figura 42*, pero fue un pedazo de 3x3 milímetros comienza la transformación martensítica en 548.9°C y termina a 287.7°C.

## 10.- Conclusiones

Los tratamientos térmicos que más influyen en el cambio significativo de la dureza son el Betatizado, a diferencia de los tratamientos térmicos de envejecimiento, el betatizado se puede controlar de manera más sencilla y rápida ya que no depende de 2 tratamientos como lo son el solubilizado y envejecimiento, siendo el betatizado de 3 h el que más dureza presentó en las microestructuras, así mismo, la dureza que arrojó el homogeneizado es muy similar a la del betatizado por 15 min, sin embargo, al ser un homogeneizado se debe tener una mejora en la trabajabilidad de la aleación teniendo una dureza considerable que puede mejorar la resistencia del material. Las durezas presentadas en la probeta de betatizado nos confirman que si se logró la transformación martensítica que buscábamos al retener la base con ayuda del temple en agua hirviendo, en comparación con la probeta testigo la dureza incremento de 60HRB a 30 HRC. otro punto relevante fue en el ensayo de calorimetría, ya que se obtuvieron 2 resultados un tanto distintos, cuando se utilizó polvo metálico de la aleación la temperatura de transformación martensíticas cambió, si bien al inicio fue similar de 548.7°C y 548.9°C respectivamente pero el final de la transformación en el polvo metálico fue de 241.1°C mientras que en la muestra de 3x3 mm fue de 287.7°C. al utilizar polvo metálico se obtiene un rango mayor para poder visualizar la transformación martensítica.

En conclusión, se cumplió con el objetivo del proyecto debido a que se pudo crear la aleación, se mostró el cambio de las microestructuras y morfología con respecto a cada tratamiento térmico, con base en eso el cambio notable en las durezas al realizar diferentes tratamientos y se encontraron las temperaturas donde empieza y termina la transformación martensítica.

## 11.- Referencias

1. Materials, T. & Company, I. Asm Handbook Volume 04: Heat Treating. 4, 2173 (1991).
2. Jose Apraiz Barreiro. Tratamientos Térmicos De Los Aceros. Journal Of Materials Processing Technology Vol. 1 (P A T R O N A T O De Publicaciones De La Escuela Especial De Ingenieros Industriales, 1949).
3. M. En I. Francisco Manuel Sánchez Arévalo. "Estudio Experimental Del Comportamiento Mecánico De Un Material Con Memoria De Forma." (Universidad Nacional Autónoma De México, 2007).
4. D.C. Achit Ei, A.V. Sandu, M.M. Al Bakri Abdullah, P. Vizureanu, A. A. Key Eng. Mater. 140–145, 594–595 (2014).
5. Callister, W. D. J. Introducción A La Ciencia E Ingeniería De Los Materiales. 3ra Edició, 380–381 (1995).
6. N. Cimpoes U, S. Stanciu, P. Vizureanu, R. Cimpoes U, D.C. Achit Ei, I. Ionit A, J. M. Metall. Sect. B-Metall. 50b (1), 69–76 (2014).
7. Y. Sutou, T. Omori, A. Furukama, Y. Takahashi, R. Kainuma, K. Yamauchi, S. Yamashita, K. Ishida, J. Biomed. Mater. Res. Part B: Appl. Biomater. 69 B, 64 (2004).
8. J. R. Davis & Davis & Associates Prepared. Asm Speciality Handbook, Copper And Copper Alloys. Asm Handbook (2001).
9. Dasgupta, R., Jain, A. K., Kumar, P., Hussein, S. & Pandey, A. Effect Of Alloying Constituents On The Martensitic Phase Formation In Some Cu-Based Smas. J. Mater. Res. Technol. 3, 264–273 (2014).
10. Zdenka Stanojevic´ Zdenka Stanojevic´ Šimšić´ A,†, Dragana Z´ Ivkovic´ B, Dragan Manasijevic´ B, T. H. G. C & Yong Dud, Mirko Gojic´ C, Stjepan Koz´uh C, Ana Kostov A, R. T. A. Thermal Analysis And Microstructural Investigation Of Cu-Rich Alloys In The Cu–Al–Ag System. J. Alloys Compd. 486–492. (2014).
11. A.T. Adorno, M.R. Guerreiro, A. V. B. Influence Of Silver Additions On The Aging Characteristics Of The Cu- 10.4 At.% Al Alloy. J. Alloy. Compd. 1-2 122-129. (1998).
12. Guilemany, J. M., Fernandez, J. & Zhang, X. M. Tem Study On The Microstructure Of Cu-Al-Ag Shape Memory Alloys. Mater. Sci. Eng. A 438–440, 726–729 (2006).
13. (Callister, 2009, págs. 351-355)
  
14. American Society For Testing Materials. (1995). Standard Practice For Preparation Of Metallographic Specimens. Estados Unidos.
15. Callister, William. (2009). Introducción A La Ciencia E Ingeniería De Los Materiales. En Tratamientos Térmicos De Aleaciones Metálicas (Págs. 351- 356). Bogotá : Reverte S.A.
16. Arneodo-Larochette P. Y Ahlers M. (2003) " (M., 2003)Crystals", Materials Science And Engineering, Vol. A361, Pp.249-257.
17. (cartagena, s.f.)