

**ESTUDIO DEL DESARROLLO DE UNA ALEACIÓN PARA ORO BLANCO DE
750 MILÉSIMAS LIBRE DE NÍQUEL Y PALADIO**

GUSTAVO ADOLFO MARTÍNEZ RUEDA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2004**

**ESTUDIO DEL DESARROLLO DE UNA ALEACIÓN PARA ORO BLANCO DE
750 MILÉSIMAS LIBRE DE NÍQUEL Y PALADIO**

GUSTAVO ADOLFO MARTÍNEZ RUEDA

Trabajo realizado como requisito
parcial para obtener el título de
Ingeniero Metalúrgico

Director
DARÍO YESID PEÑA BALLESTEROS
Ingeniero Metalúrgico. Magíster. Ph.D.

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

2004

AGRADECIMIENTOS

Al profesor DARÍO YESID PEÑA por sus valiosos aportes y por su apoyo para desarrollar esta investigación.

Centro de Desarrollo Productivo de Joyería (CDP), a su director JUAN CARLOS DAZA y a todo su equipo de trabajo por su colaboración y la oportunidad brindada para desarrollar este proyecto.

Al ingeniero WILSON VESGA y a todos los profesores que me asesoraron con sus conocimientos.

Al profesor JOSÉ CARLOS GUTIÉRREZ por su apoyo y asesoría.

A LUZ DARY FERREIRA (Química), por su colaboración y compañía incondicional en todo momento.

A mis familiares y amigos.

DEDICATORIA

Dios me ha favorecido con dones infinitos

*A puesto a mi lado unos padres maravillosos que me han apoyado
y me han brindado toda su paciencia y sabiduría así como mis hermanos
con los que siempre he podido contar*

*Unos amigos, que aunque son pocos,
realmente conocen el verdadero valor de la amistad*

El amor, que me ilumina y acompaña en el camino

*Educadores que me han mostrado el valor de saber
y cuanto falta por aprender*

La vida.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. EL ORO EN LA JOYERÍA	3
1.1 PROPIEDADES DEL ORO PURO	3
1.2 GENERALIDADES DEL ORO BLANCO DE 750 MILÉSIMAS	3
1.3 EL ORO BLANCO EN EL MERCADO MUNDIAL	4
1.3.1 Oro blanco con base níquel	5
1.3.2 Oro blanco con base paladio	6
1.3.3 Oro blanco con base níquel y paladio	7
1.3.4 Oro blanco libre de níquel y paladio	8
1.4 EFECTO BLANQUEADOR DE LOS METALES EN EL ORO	8
1.5 CONCEPTOS PARA EL DISEÑO DE ALEACIONES	10
1.5.1 Manejo de diagramas de equilibrio	10
1.5.2 Reglas de Hume - Rothery	11
1.6 EL COLOR EN LA JOYERÍA DE ORO BLANCO	13
1.7 REGLAMENTACIÓN DEL CONTENIDO DE NÍQUEL EN LA JOYERÍA	16
1.8 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS METALES	17
1.8.1 Módulo de elasticidad	17
1.8.2 Resistencia máxima a la tensión	18
1.8.3 Porcentaje de elongación en la fractura	18
1.8.4 Porcentaje de reducción de área en la fractura	19
2. METODOLOGÍA	20

2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	20
2.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS LIGAS COMERCIALES	20
2.3 ANÁLISIS DE LA ALEACIÓN DE ORO BLANCO DE 750 MILÉSIMAS	20
2.4 FORMULACIÓN DE ALEACIONES	21
2.5 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y RESISTENCIA A AGENTES QUÍMICOS DE LAS ALEACIONES PROPUESTAS	21
2.6 ELABORACIÓN DE LIBRO	22
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	23
3.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS LIGAS COMERCIALES	23
3.2 ANÁLISIS QUÍMICO POR ABSORCIÓN ATÓMICA	26
3.3 METALOGRAFÍA Y MICRODUREZA DE LAS LIGAS COMERCIALES EN ESTUDIO	30
3.3.1 Microestructuras de las ligas comerciales	30
3.3.2 Microdurezas Vickers de las ligas comerciales	33
3.4 PREPARACIÓN DE ORO BLANCO DE 750 MILÉSIMAS A PARTIR DE LAS LIGAS COMERCIALES	35
3.5 ENSAYO DE TENSIÓN	35
3.6 DETERMINACIÓN DE MICRODUREZAS Y ANÁLISIS METALOGRÁFICO DE LAS ALEACIONES COMERCIALES DE ORO BLANCO	42
3.6.1 Determinación de microdurezas de las aleaciones comerciales	42
3.6.2 Análisis metalográfico de las aleaciones comerciales	44
3.7 PROPIEDADES DE LOS METALES BLANQUEADORES POTENCIALES	47
3.7.1 El cromo	49

3.7.2 El manganeso	50
3.7.3 El hierro	51
3.7.4 El cobalto	52
3.7.5 El aluminio	53
3.8 ESTUDIO DE LAS ALEACIONES DE ORO BLANCO OBTENIDAS CON LOS METALES PROPUESTOS	54
3.8.1 Fundición de los metales	55
3.8.2 Determinación de microdurezas de las aleaciones propuestas	61
3.8.3 Análisis metalográfico de las aleaciones propuestas	63
3.8.4 Ensayo de maleabilidad de las aleaciones propuestas	66
4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	69
4.1 EVALUACIÓN DEL COLOR DE LAS ALEACIONES COMERCIALES Y PROPUESTAS	68
5. CONCLUSIONES	74
6. RECOMENDACIONES	77
CITAS BIBLIOGRÁFICAS	79
BIBLIOGRAFÍA	80
ANEXOS	85

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Elementos potenciales para las aleaciones de oro blanco	9
Tabla 2. Propiedades de los elementos para las aleaciones de oro blanco	13
Tabla 3. Ligas presentes en el mercado de la región	23
Tabla 4. Aspectos principales de las fichas técnicas de las ligas comerciales	25
Tabla 5. Identificación de los elementos presentes en las ligas comerciales	27
Tabla 6. Cantidad de níquel presente en 10 g de oro blanco	29
Tabla 7. Resultados del ensayo de microdureza de las ligas comerciales	34
Tabla 8. Resultados del ensayo de tensión en las probetas de oro blanco	37
Tabla 9. Valores de dureza Vickers de las aleaciones comerciales de oro blanco	43
Tabla 10. Microestructuras reveladas de las aleaciones de oro blanco de 750 milésimas obtenidas a partir de las ligas comerciales	45
Tabla 11. Solubilidad de los metales blanqueadores potenciales en el oro	47
Tabla 12. Comparación entre la temperatura de fusión de los metales puros y la temperatura aproximada de fusión de la aleación	55
Tabla 13. Superficie pulida de las aleaciones resultantes con los metales alternativos sin ataque	59
Tabla 14. Aleaciones ternarias obtenidas con el aluminio	60
Tabla 15. Dureza de las aleaciones obtenidas con los metales propuestos	62

Tabla 16. Imágenes de las microestructuras reveladas de las aleaciones con los metales propuestos	63
Tabla 17. Resultados del ensayo de laminación de las aleaciones de oro con los metales propuestos	67
Tabla 18. Evaluación del color del oro blanco con las ligas comerciales y los metales en estudio en las probetas sin ataque químico	70
Tabla 19. Relación entre el contenido de hierro y color de las ligas comerciales	72

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Porcentaje de las aleaciones en el mercado del oro blanco	5
Figura 2. Síntesis aditiva de los colores	14
Figura 3. Representación del sistema CIELAB basado en coordenadas tridimensionales	15
Figura 4. Unidad de moldeo METASERV y baquelita obtenida	31
Figura 5. Microestructuras de las ligas comerciales en el mercado local	32
Figura 6. Escleroscopio Leitz Weslar	34
Figura 7. Montaje de los alambres de la aleación en el tensómetro Monsanto	36
Figura 8. Diagramas esfuerzo Vs. Deformación de la aleación de oro blanco con las ligas comerciales	39
Figura 9. Analizador de imágenes LEICA Q6500MC	44
Figura 10. Descripción del molde para la fundición de las probetas	56
Figura 11. Montaje del equipo de centrífuga en el CDP de joyería de Bucaramanga	57
Figura 12. Probetas deformadas en el ensayo de maleabilidad de las aleaciones con los metales propuestos	67

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DEL DESARROLLO DE UNA ALEACIÓN PARA ORO BLANCO DE 750 MILÉSIMAS LIBRE DE NÍQUEL Y PALADIO*

AUTOR: MARTÍNEZ RUEDA. Gustavo Adolfo**

PALABRAS CLAVES: Oro blanco, joyería, metales preciosos, níquel, paladio, fundición, metales blanqueadores, aleación oro blanco.

DESCRIPCIÓN:

Este proyecto realizó un estudio preliminar sobre metales alternativos para la fabricación de la aleación de oro blanco de 750 milésimas, que no tengan un efecto perjudicial sobre la salud y que puedan llegar a implementar los talleres de la región. Esto se traduce en encontrar metales sustitutos para el níquel y el paladio que son los elementos blanqueadores más importantes para este tipo de joyería. El oro blanco de 750 milésimas (18 K) deja un rango pequeño de acción para los metales blanqueadores, lo que dificulta su obtención y a su vez, es una de las joyerías que tiene gran demanda en el mercado local.

Inicialmente se revisó la información actualizada acerca del trabajo con oro blanco, seguido del estudio de las aleaciones más utilizadas en los talleres de la región, en los cuales se trabaja con ligas comerciales como progold, aloe, united 880, united 907 y la aleación tradicional de Au-Pd-Ag, identificando la composición química por medio de absorción atómica y ensayos de tensión y dureza para estudiar su comportamiento, posteriormente, se analizaron los elementos alternativos y su efecto blanqueador al incorporarlo en el oro puro.

Los resultados obtenidos en el estudio del efecto blanqueador de metales alternativos en el oro, muestra que es importante ampliar la investigación, por separado, de cada uno de los siguientes metales: hierro (Fe), manganeso (Mn), aluminio (Al) – estaño (Sn) y cromo; a fin de determinar que elementos pueden trabajar conjuntamente para mejorar su comportamiento mecánico.

* Trabajo de Grado

**Facultad de Fisicoquímicas. Ing. Metalúrgica y Ciencia de Materiales. PEÑA, Darío Yesid

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE DEVELOPMENT OF AN ALLOY FOR WHITE GOLD OF 750 THOUSANDTH FREE OF NICKEL AND PALLADIUM *

AUTHOR: MARTÍNEZ RUEDA. Gustavo Adolfo **

KEY WORDS: White gold, jewellery, precious metals, nickel, palladium, casting, metals bleaches, white gold alloy.

DESCRIPTION:

This project carried out a preliminary study on alternative metals for the production of the alloy of 750 ‰ white gold that it don't have a harmful effect on the health and that jeweler of the region can end up implement it. This is translated in finding metals substitutes for the nickel and the palladium that are the elements more important bleaches for this jewellery's type. The 750 ‰ white gold (18 K) leaves a small range of action for the metals bleaches, what hinders their obtaining and in turn, it is one of the carat gold alloys that has great demand in the local market.

Initially the current information was revised about the work with white gold, followed by the study of the alloys more used in the shops of the region, in which they work with commercial alloys as progold, aloe, united 880, united 907 and the traditional alloy of Au-Pd-Ag, identifying the chemical composition by means of atomic absorption and rehearsals of tension and hardness to study its behavior, later on, the alternative elements and its effect bleach were analyzed when incorporating it in the pure gold.

The results obtained in the study of the effect bleach of alternative metals in the gold, it shows that it is important to enlarge the investigation, for separate, of each one of the following metals: iron (Fe), manganese (Mn), aluminum (Al) – tin (Sn) and chrome (Cr); in order to determine what elements can work jointly to improve their mechanical behavior.

* Project of grade

** Physical-chemistry engineering faculty. Metallurgical Engineering. PEÑA, Darío Yesid

INTRODUCCIÓN

El metal más trabajado en joyería es, sin duda alguna, el oro seguido por la plata y el platino. Durante mucho tiempo el oro fue el único metal disponible cuyo brillo permanecía inalterable a través del tiempo, pero de igual forma se desconocía todo lo referente a aleaciones y se puede decir que el oro se trabajaba prácticamente en estado nativo, de aquí que se encuentren en los museos piezas de oro de épocas muy remotas, con diversas composiciones que no guardan ninguna relación entre sí.

Posteriormente, el hombre aprendió a trabajar con mezclas de metales, es decir, aleaciones y se dio cuenta de las ventajas que esto le proporcionaba; podía variar sus colores y sus propiedades tanto físicas como mecánicas.

Tiempo atrás se inició la búsqueda de un metal precioso de color blanco brillante que permitiera realizar combinaciones con otros metales y piedras preciosas para producir una joya más vistosa, debido a que cuando los destellos de la gema se reflejan en la superficie brillante del metal se magnifican, incrementando el tamaño aparente de la misma. Para tal objeto el metal por excelencia es el platino, pero su elevado precio, relativa escasez y dificultad de manufactura ha hecho que se busquen otras alternativas.

Actualmente, la industria de metales preciosos a nivel mundial produce varias aleaciones comercializadas como oro blanco con base en metales como oro, plata, níquel y alguno de los metales del grupo platinoide (platino, paladio, rutenio, rodio, osmio e iridio) siendo el paladio el más frecuente. El paladio, ha

aumentado significativamente su costo, haciendo difícil la implementación del mismo en la microempresa y los talleres de la región.

Por otro lado, existen ligas de bajo costo con las cuales se puede producir oro blanco que contienen como elemento base el níquel, esto representa otro inconveniente debido a la aparición de normas que regulan su contenido en las piezas de joyería, ya que se ha relacionado con problemas cutáneos, como dermatitis por contacto.

Este proyecto realizó un estudio preliminar sobre metales alternativos para la fabricación de la aleación de oro blanco de 750 milésimas, que no tengan un efecto perjudicial sobre la salud y que puedan llegar a implementar los talleres de la región. Esto se traduce en encontrar metales sustitutos para el níquel y el paladio que son los elementos blanqueadores más importantes para este tipo de joyería. El oro blanco de 750 milésimas (18 K) deja un rango pequeño de acción para los metales blanqueadores, lo que dificulta su obtención y a su vez, es una de las joyerías que tiene gran demanda en el mercado local.

En el documento se presenta inicialmente la información actualizada acerca del trabajo con oro blanco, seguido del estudio de las aleaciones más utilizadas en los talleres de la región y posteriormente, se analizan los elementos alternativos y su efecto blanqueador al incorporarlo en el oro puro.

1. EL ORO EN LA JOYERÍA

1.1 PROPIEDADES DEL ORO PURO

El oro puro es el más maleable y dúctil de todos los metales. Puede laminarse hasta conseguir un espesor de $1,3 \times 10^{-5}$ cm y una cantidad de 29 g se puede estirar hasta lograr un cable de 100 Km de largo. Es uno de los metales más blandos y un buen conductor tanto eléctrico como térmico. El oro es de color amarillo y tiene un brillo lustroso. Como otros metales en polvo, el oro finamente dividido presenta un color negro y en suspensión coloidal su color varía entre el rojo rubí y el púrpura.

El oro es un metal muy inactivo. No le afecta el aire, el calor, la humedad ni la mayoría de los disolventes. Sólo es soluble en agua de cloro, agua regia o una mezcla de agua y cianuro de potasio. Tiene un punto de fusión de 1.064°C , un punto de ebullición de 2.807°C y una densidad relativa de 19,3. Su masa atómica es de 196,967.

1.2 GENERALIDADES DEL ORO BLANCO DE 750 MILÉSIMAS

Se constituye como el grupo especial de aleaciones más complejas para joyería. Se introdujo por primera vez en 1917 - 1918 en sustitución de las aleaciones de platino y de platino - iridio, por motivos de la difícil tecnología del platino, que incluye su elevado punto de fusión, una aleación casi única de 950 milésimas y su fragilidad, factores que aumentan los costos de los procesos. El oro blanco original era una aleación de oro - paladio que contenía aproximadamente un 15%

de paladio, sin embargo, estas aleaciones eran blandas, por lo cual se desarrollaron posteriormente un número de aleaciones más duras de oro - cobre - níquel - zinc que tenían suficiente oro y que cuando se pulían tomaban un brillo blanco característico, generalmente la composición más utilizada en este sistema es de 75% Au, 17.3% Ni, 5.47% Zn y 2.23% Cu.

Según su velocidad de enfriamiento, el sistema Au-Ni se puede encontrar en forma homogénea o heterogénea que puede contener un componente rico en oro y otro rico en níquel; en su forma homogénea la aleación es resistente al ácido nítrico, al contrario si se encuentra separada en componentes, se hace fácilmente atacable.

Este rango de inmiscibilidad se extiende al sistema Au - Ni - Cu y está presente de forma asimétrica, con respecto al contenido de oro, en todas las características básicas de las aleaciones de oro blanco, razón por la cual se hace diferente para cada composición comercial (18k, 14k, 10k, etc.), esto contrasta con las aleaciones de oro amarillo, las cuales pueden ser transformables fácilmente de una composición a otra.

1.3 EL ORO BLANCO EN EL MERCADO MUNDIAL

En cuanto al oro blanco y el mercado mundial, las aleaciones que se encuentran pueden ser clasificadas en cuatro grupos principales:

- Oro blanco con base níquel
- Oro blanco con base paladio
- Oro blanco sin níquel y paladio
- Oro blanco con níquel y paladio

La representación en porcentaje de cada aleación de la cantidad total de oro blanco que se produce, se muestra en la siguiente figura:

Figura 1. Porcentaje de las aleaciones en el mercado del oro blanco



Fuente: POLIERO, M. [1]

1.3.1 Oro blanco con base níquel. Es el más utilizado para la producción de joyas y las razones principales para utilizar esta aleación son:

- Bajo costo de los elementos aleantes
- Temperatura de líquido por debajo de 960°C
- Buenas características mecánicas y de fundición
- Buen efecto blanqueador
- El color es satisfactorio, pero algunas veces frío como el acero

Para estas aleaciones es difícil tener un buen color y buena trabajabilidad al mismo tiempo. Este grupo está basado en sistemas ternarios de oro-cobre-níquel con adiciones de zinc.

El cobre es adicionado para mejorar la trabajabilidad del oro blanco, pero representa un compromiso entre color y ductilidad debido a que es un metal coloreado y puede causar un incremento remarcado de dureza.

El zinc es utilizado en estas aleaciones como un elemento blanqueador secundario, no únicamente para compensar el efecto colorante del cobre, sino también para realzar el efecto blanqueador del níquel y para disminuir la temperatura de líquido del sistema oro-cobre-níquel. Sin embargo, las adiciones de zinc son limitadas debido a que reduce la resistencia de la aleación e incrementa la susceptibilidad al agrietamiento ya que se evapora en la aleación fundida. El oro blanco con níquel es utilizado para todos los rangos de composición estándar.

1.3.2 Oro blanco con base paladio. Estas aleaciones tienen un color blanco-gris cálido y brillo lustroso que llama la atención, sus características favorables son:

- Excelente resistencia a la corrosión
- Son las únicas aleaciones libres de níquel comercialmente disponibles que tienen muy buen color
- Pueden fundirse con métodos convencionales
- Son bastante resistentes a los agentes químicos
- No tiende a formar óxidos insolubles durante la fusión
- Poseen dureza baja que las hace convenientes para fijar gemas y trabajarlas a mano

Sin embargo, también presentan las siguientes características desfavorables:

- Alto costo del paladio
- Alta gravedad específica, lo que significa que la joya tiene un alto peso y un alto costo
- Alta temperatura de líquido ($>1050^{\circ}\text{C}$)

Las características mecánicas de estas aleaciones y principalmente el incremento de la temperatura de líquido, pueden variar en un rango amplio en función del contenido de paladio. Están basadas en el sistema ternario oro-paladio-plata y el comportamiento metalúrgico depende de los diagramas de fase binarios Au-Pd, Au-Ag y Pd-Ag.

1.3.3 Oro blanco con base níquel y paladio. El oro blanco con base de níquel contiene paladio por las siguientes razones:

- Disminución de la dureza en la pieza fundida (adecuado principalmente para la colocación de gemas)
- Disminución del grado de liberación del níquel en solución
- Incremento de la resistencia a la corrosión
- Mejoramiento del color blanco, sin incrementar la dureza
- Optimización de la calidad final del producto

El oro blanco con base de paladio contiene también pequeñas adiciones de níquel (1-2%) por las siguientes razones:

- Mejora la ductilidad y maleabilidad
- Incrementa la dureza
- Incrementa la resistencia a la corrosión
- Disminuye el tamaño de grano en las aleaciones de fundición

El oro blanco con base en níquel y paladio no es muy utilizado en la actualidad por los factores enumerados anteriormente.

1.3.4 Oro blanco libre de níquel y paladio. Actualmente, estas aleaciones están vigentes pero aún muy lejos de resultados satisfactorios en cuanto a la búsqueda de los sustitutos ideales del níquel y el paladio. Hasta ahora todos los sustitutos experimentados presentan problemas sustanciales como alta reactividad con el oxígeno, reaccionan con el grafito, baja ductilidad, etc.

1.4 EFECTO BLANQUEADOR DE LOS METALES EN EL ORO

En términos generales, todos los metales tienen un color blanco grisáceo a excepción del oro y el cobre, pero pocos de ellos tienen un buen efecto blanqueador sobre el oro, por esta razón ha sido objeto de estudio dicho efecto. Un resumen de los resultados y las comparaciones de las propiedades obtenidas con varios metales se muestra, de manera general, en la tabla 1.

Tabla 1. Elementos potenciales para las aleaciones de oro blanco

ELEMENTO	EFEECTO BLANQUEADOR	OTRAS CARACTERÍSTICAS
Ag	Insuficiente	En alta concentración susceptibilidad a empañarse
Pd	Muy bueno	Muy costoso, alto punto de fusión (1552°C)
Pt	Muy bueno <Pd	Muy costoso, alto punto de fusión (1769°C)
<u>Co</u>	Débil	Alergénico, ferromagnético
<u>Cr</u>	Bueno	Incrementa punto de fusión, alta reactividad
<u>Ni</u>	Muy bueno	Alergénico
<u>In</u> <u>Sn</u> <u>Zn</u>	Bastante bueno	En altas proporciones produce alta dureza y baja trabajabilidad. Altas proporciones de Zn causan problemas de reciclaje (Volatilidad).
<u>Al</u> <u>Ti</u>	Débil	Baja trabajabilidad con pequeñas adiciones.
V	Débil	Tóxico, poca trabajabilidad en frío y muestra alta reactividad, difícil implementación
Ta Nb	Débil	Alta actividad, difícil implementación
<u>Fe</u>	Bueno	Baja solubilidad en el oro (precipitación), da carácter ferromagnético a la aleación e incrementa la susceptibilidad a la corrosión, en proporciones sobre el 10% causa excesiva dureza, baja trabajabilidad u oxidación durante la micro fusión
<u>Mn</u>	Bueno	Alta reactividad y tendencia a la formación de óxidos, proporciones >10% dificultan su aplicación, estos problemas se reducen al combinarlo con Pd

Fuente: POLIERO, M. [1], CRETU, C. [2]

Los elementos que están subrayados en la tabla son los que se encuentran actualmente en experimentación. Además del efecto blanqueador, son características importantes la facilidad de trabajo del metal, la solubilidad, la reactividad, toxicidad y costos, para considerarlos como metales adecuados para el sector joyero.

1.5 CONCEPTOS PARA EL DISEÑO DE ALEACIONES

A continuación se presentan conceptos importantes a considerar para el diseño de nuevas aleaciones.

1.5.1 Manejo de diagramas de equilibrio. La aparición o desaparición de fases que tienen lugar en el proceso de enfriamiento de un metal o de una aleación se estudia mediante los diagramas de equilibrio, conocidos también como diagramas de fase o de constitución. En el anexo A, se muestran los diagramas de equilibrio reportados en la literatura que relacionan el oro con los diferentes elementos considerados en este estudio como blanqueadores potenciales; también aparecen los diagramas binarios que los relacionan entre sí.

Tienen la forma de un mapa, definiendo las regiones de estabilidad de las diversas fases que pueden ocurrir en un sistema de aleación bajo la condición de presión constante (atmosférica). Las coordenadas de estos diagramas son la temperatura (ordenada) y la composición (abscisa).

En los diagramas de equilibrio se muestran las interrelaciones entre las fases y los dos últimos parámetros mencionados en un sistema de aleación únicamente bajo condiciones de equilibrio. Estos diagramas no se aplican de modo directo a metales fuera de equilibrio. Un metal enfriado rápidamente desde una temperatura elevada a una temperatura baja (por ejemplo, a temperatura ambiente) puede poseer fases que sean más características de la temperatura elevada que de la temperatura baja. Con el tiempo, y como resultado del movimiento atómico activado térmicamente, la probeta enfriada puede alcanzar su estado de equilibrio de baja temperatura. Si esto ocurre, las relaciones de fase en la probeta se conformarán según el diagrama de equilibrio.

En otras palabras, el diagrama de fase a cualquier temperatura, proporciona la información sobre el estado de la aleación sólo si se da el tiempo suficiente al metal para alcanzar el equilibrio.

La clasificación de los diagramas de fases de acuerdo a la solubilidad de los metales entre sí es:

- Totalmente solubles en el estado líquido y totalmente solubles en el estado sólido.
- Totalmente solubles en el estado líquido y totalmente insolubles en el estado sólido.
- Totalmente solubles en el estado líquido y parcialmente solubles en el estado sólido.
- Parcialmente solubles en el estado líquido y parcialmente solubles en el estado sólido.
- Totalmente insolubles en el estado líquido y totalmente insolubles en el estado sólido.

Son muchos los factores que se deben tener en cuenta al plantear mezclas entre metales, dado que se pueden conformar pares galvánicos, reaccionar con la piel, presentar dificultades por la diferencia marcada entre los puntos de fusión o simplemente por no aportar las propiedades que requiere la liga.

1.5.2. Reglas de Hume-Rothery. Las condiciones que determinan las solubilidades, tanto en el sistema de aleación intersticial como en el sustitucional han sido estudiadas por Hume-Rothery, quien señaló que solo ocurre una solubilidad sólida extensa de un metal en otro si los diámetros de los metales

difieren en menos del 15%. Este criterio para la solubilidad se conoce como factor de tamaño y se relaciona directamente a las deformaciones producidas en la red del solvente por los átomos del soluto. El factor de tamaño es sólo una condición necesaria para un grado de solubilidad elevado, no es una condición suficiente, ya que se deben satisfacer otros requerimientos.

Otro de los factores a determinar son las posiciones relativas de los elementos en la serie electroquímica. Dos elementos que quedan muy separados en esta serie, no se alearán en el sentido normal, sino que se combinarán de acuerdo a las reglas de valencia química. Los elementos más electropositivos ceden sus electrones de valencia a los elementos más electronegativos, resultando la formación de un cristal con un enlace iónico, si los metales quedan muy cerca uno de otro en esta serie, tienden a actuar como si fuesen químicamente iguales formando un enlace metálico en lugar de uno iónico.

Otras dos variables de importancia, aún cuando los dos anteriores se cumplan, son que ambos metales puros tengan la misma valencia y cristalicen en la misma forma reticular. A continuación se presenta en la tabla 2, un resumen de algunas de las características principales de los metales en estudio, tales como radio atómico, estructura cristalina, punto de fusión, serie de potenciales, entre otros.

Tabla 2. Propiedades de los elementos para aleaciones de oro blanco

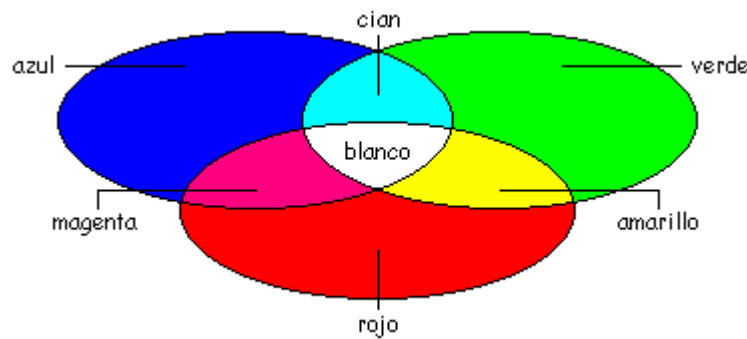
Nombre	Símbolo	Masa atómica	Radio atómico [pm]	Estructura cristalina	Densidad	Punto de fusión [°C]	Punto de ebullición [°C]	Serie de Potenciales (25°C, 1 bar)	
								Red $\rightleftharpoons$ Ox + e	ε° (Voltios)
Oro	Au	196.97	144	CCC	19.3	1064.4	2807	Au $\rightleftharpoons$ Au ³⁺ + 3e	+1.498
Paladio	Pd	106.4	-----	----	12.0	1552	3140	Pd $\rightleftharpoons$ Pd ²⁺ + 2e	+0.987
Plata	Ag	107.87	144	CCC	10.5	961.93	2212	Ag $\rightleftharpoons$ Ag ¹⁺ + 1e	+0.799
Cobre	Cu	63.55	128	CCC	8.93	1083.4	2567	Cu $\rightleftharpoons$ Cu ²⁺ + 2e	+0.337
Estaño	Sn	118.69	140	Tetra	7.3	231.97	2270	Sn $\rightleftharpoons$ Sn ²⁺ + 2e	-0.136
Molibdeno	Mo	95.94	---	----	10.2	2617	4612	Mo $\rightleftharpoons$ Mo ³⁺ + 3e	-0.20
Níquel	Ni	58.70	124	CCC	8.90	1453	2732	Ni $\rightleftharpoons$ Ni ²⁺ + 2e	-0.25
Cadmio	Cd	112.41	149	----	8.64	320.9	765	Cd $\rightleftharpoons$ Cd ²⁺ + 2e	-0.403
Hierro	Fe	55.85	124	CC	7.86	1535	2750	Fe $\rightleftharpoons$ Fe ²⁺ + 2e	-0.41
Cobalto	Co	58.93	125	HC	8.83	1495	2870	Co $\rightleftharpoons$ Co ³⁺ + 3e	-0.74
Cromo	Cr	51.99	125	CC	7.19	1857	2672	Cr $\rightleftharpoons$ Cr ³⁺ + 3e	-0.744
Cinc	Zn	65.38	133	HC	7.2	419.58	907	Zn $\rightleftharpoons$ Zn ²⁺ + 2e	-0.763
Manganeso	Mn	54.94	118	C	7.3	1244	1962	Mn $\rightleftharpoons$ Mn ²⁺ + 2e	-1.18
Aluminio	Al	26.98	143	CCC	2.70	660.37	2467	Al $\rightleftharpoons$ Al ³⁺ + 3e	-1.66

Fuente: MERCK [3]

1.6 EL COLOR EN LA JOYERIA DE ORO BLANCO

El color es un fenómeno físico de la luz o de la visión, asociado con las diferentes longitudes de onda en la zona visible del espectro electromagnético. Como sensación experimentada por los seres humanos y determinados animales, la percepción del color es un proceso neurofisiológico muy complejo. Los métodos utilizados actualmente para la especificación del color se encuadran en la especialidad llamada colorimetría y consisten en medidas científicas precisas basadas en las longitudes de onda de tres colores primarios. En la figura 2 se muestra la síntesis aditiva de dichos colores.

Figura 2. Síntesis aditiva de los colores



Fuente: Gran Diccionario de las Ciencias ilustrado en color [4]

La luz visible está formada por vibraciones electromagnéticas cuyas longitudes de onda van de unos 350 a unos 750 nanómetros. La luz blanca es la suma de todas estas vibraciones cuando sus intensidades son aproximadamente iguales.

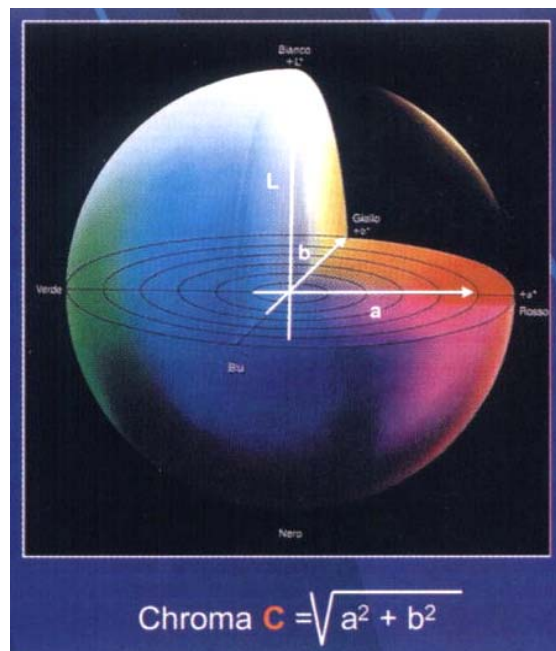
En toda radiación luminosa se pueden distinguir dos aspectos: uno cuantitativo, su intensidad, y otro cualitativo, su cromaticidad. Esta última viene determinada por dos sensaciones que aprecia el ojo: la tonalidad y la saturación. Una luz compuesta por vibraciones de una única longitud de onda del espectro visible es cualitativamente distinta de una luz de otra longitud de onda.

En lo relativo al oro blanco, la problemática está planteada por la comparación entre los diferentes resultados obtenidos en las investigaciones encaminadas a colorear el oro, por esta razón se hace necesario un método que pueda permitir la medición exacta de esta propiedad que siempre se ha considerado como cualitativa y subjetiva.

Por tal motivo, se ha desarrollado un sistema denominado CIELAB, este es un método internacionalmente reconocido para la medición del color, realizado por

CIE (International Commission on Illumination) y forma parte de la American Society For Testing and Materials Standard. Esta técnica representa el color en un sistema tridimensional con lo cual se puede realizar una evaluación cuantitativa y objetiva del color de las aleaciones de joyería obtenidas. Una representación del método se da en la siguiente figura.

Figura 3. Representación del sistema CIELAB basado en coordenadas tridimensionales



Fuente: POLIERO, M. [1]

Las coordenadas a y b dan la intensidad del color del objeto y la tercera, L es la luminiscencia (brillo); **a** mide el componente rojo - verde y **b** mide el componente amarillo - azul, **L** mide el brillo y va desde 0 (negro) a 100 (blanco) a través de diferentes matices de gris. Estas variables son determinadas por el analizador de espectro VISSPECTRA 33.

Si se desea reducir el número de parámetros requeridos para la descripción del color, se puede considerar la distancia del punto bajo consideración al origen de los ejes, esta distancia es el **Croma** (C), donde $C = (a^2 + b^2)^{1/2}$.

1.7 REGLAMENTACIÓN DEL CONTENIDO DE NÍQUEL EN LA JOYERIA

Debido al aumento en el número de casos de reacciones alérgicas por el uso de joyas en general, con altos contenidos de níquel, la comunidad europea ha implementado una normativa conducida a controlar su uso. La Directiva Europea (CE 94/27) publicada en julio de 1999 limita el contenido de níquel a los siguientes parámetros: [5]

- En joyas que no van a tener un contacto prolongado con la piel, se estipula un porcentaje máximo permisible de 0.05% en peso.
- En joyas que van a tener un contacto prolongado o permanente con la piel (cadenas, anillos, relojes), se plantea una cantidad máxima de $0.5\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{semana}$.

Para este último parámetro se diseñó una prueba que simula el grado de disolución que puede presentar el níquel en una solución de sudor artificial; la muestra de prueba se sumerge durante una semana en ésta, en un recipiente de vidrio libre de níquel a una temperatura aproximada de 30°C . El sudor artificial es una solución acuosa de cloruro de sodio, ácido láctico, urea, amoníaco y ácido nítrico. Posteriormente, la muestra se remueve y se lava con agua destilada y en la solución se determinan los elementos disueltos por medio de absorción atómica.

En lo concerniente a los joyeros Colombianos, se presenta una problemática que va más allá de la simple implementación de aleaciones libres de níquel; se trata de la posición desfavorable en la que se encuentran, dado que si desean exportar su trabajo deben cumplir severos controles y cumplimiento de la reglamentación vigente para la Unión Europea y Estados Unidos (país que adoptó esta directiva), lo cual implica un incremento en costos y rechazo de la mercancía; situación que no afecta a estos países dado que sus productos tienen mercado libre en Colombia.

Por esta razón el Centro de Desarrollo Productivo que ha sido nombrado por ICONTEC como Unidad Sectorial de Normalización (USN) estudia actualmente la aplicación de normas sectoriales encaminadas a nivelar la joyería en Santander y en Colombia con los estándares internacionales, dentro de los cuales se encuentra la norma CDPJ - P01 que limita el contenido de níquel en la joyería a los límites enumerados anteriormente.

1.8 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS METALES

Las propiedades mecánicas de metales y aleaciones que son importantes en ingeniería para el diseño y que pueden ser obtenidas del ensayo de tensión son:

1.8.1 Módulo de elasticidad. Al comenzar a aplicar la carga en el ensayo de tensión, la deformación que presenta el metal es de naturaleza elástica. Esto es, si se retira la carga aplicada, la muestra volverá a su longitud original. En general, los metales y las aleaciones muestran una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación en la región elástica del diagrama esfuerzo-deformación que está descrito por la ley de Hooke: [6]

$$\sigma(\text{esfuerzo}) = E \varepsilon(\text{deformación}) \quad (1)$$

$$E = \frac{\sigma(\text{esfuerzo})}{\varepsilon(\text{deformación})}, \quad (\text{unidades psi o Pa}) \quad (2)$$

donde E es el *módulo de elasticidad* o *módulo de Young*

1.8.2 Resistencia máxima a la tensión. Es la fuerza máxima alcanzada en la curva esfuerzo - deformación. Si la probeta desarrolla una disminución localizada en el área de la sección transversal (estricción), el esfuerzo en ingeniería disminuirá con la deformación hasta que se produzca la rotura. El metal o la aleación continúa aumentando el esfuerzo hasta alcanzar el esfuerzo de fractura, debido a que se utiliza el área de sección transversal original para determinar el esfuerzo en ingeniería.

La resistencia máxima a la tensión de un metal se determina trazando una línea horizontal desde el punto máximo de la curva esfuerzo - deformación al eje del esfuerzo, donde la línea corta al eje de esfuerzo se llama *resistencia máxima a la tensión* o simplemente *resistencia a la tensión*. [6]

1.8.3 Porcentaje de elongación en la fractura. La cantidad de elongación que experimenta una muestra durante la prueba proporciona un valor de la ductilidad de un metal. La ductilidad se expresa usualmente como porcentaje de elongación, en general, a mayor ductilidad mayor es el porcentaje de elongación.

Durante el ensayo de tensión un extensómetro puede ser utilizado para medir continuamente la deformación de la muestra que está siendo ensayada. El porcentaje de elongación puede ser calculado también midiendo con calibradores la elongación final al unir la muestra fracturada empleando la ecuación: [6]

$$\% \text{ elongación} = \frac{\text{longitud final} - \text{longitud inicial}}{\text{longitud inicial}} \times 100 \quad (3)$$

El porcentaje de elongación indica además la calidad del metal, ya que al presentarse porosidades o inclusiones disminuye su valor por debajo del normal.

1.8.4 Porcentaje de reducción del área en la fractura. La disminución del área en la sección transversal (estricción) y su relación con el área inicial también puede ser utilizada como una medida de la ductilidad del metal, en donde el porcentaje de reducción de área puede ser determinado por la ecuación: [6]

$$\% \text{ reducción de área superficial} = \frac{\text{área inicial} - \text{área final}}{\text{área inicial}} \times 100 \quad (4)$$

De la misma forma, este porcentaje puede indicar imperfecciones en el metal.

2. METODOLOGÍA

La metodología que se siguió en el desarrollo del proyecto fue la siguiente:

2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realizó una búsqueda bibliográfica relacionada con el oro, sus aleaciones y la joyería del oro blanco en libros, revistas especializadas, catálogos, internet, etc. para ubicar la investigación en el marco conceptual actual.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS LIGAS COMERCIALES

- Se identifican las ligas comerciales más utilizadas en el mercado local con sus respectivas especificaciones de uso.
- Identificación completa de los componentes de las ligas, por medio de análisis cualitativo y cuantitativo utilizando la técnica de Absorción Atómica.

2.3 ANÁLISIS DE LA ALEACIÓN DE ORO BLANCO DE 750 MILÉSIMAS

- Producción de oro blanco de 750 milésimas a partir de las ligas comerciales disponibles en el mercado local, siguiendo las recomendaciones de las cartas técnicas para cada una de las ligas.

- Estudio del comportamiento físico - mecánico de la aleación de oro blanco, determinando su resistencia a la tracción y dureza con el Tensómetro Monsanto y el Escleroscopio Leitz Weslar respectivamente, del laboratorio de caracterización de materiales de la U.I.S y resistencia al ataque de soluciones ácidas, a fin de establecer el papel de cada elemento en la aleación.

2.4 FORMULACIÓN DE ALEACIONES

- Proponer metales que puedan suplantar al níquel y al paladio como cromo, manganeso, cobalto, hierro y aluminio, que al alearse con el oro produzcan la coloración deseada para la joyería del oro blanco.
- Revisar la toxicología de los metales propuestos.

2.5 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y RESISTENCIA A AGENTES QUÍMICOS DE LAS ALEACIONES PROPUESTAS

- Estudio de la coloración obtenida a partir de los metales propuestos, evaluación de su comportamiento mecánico y la resistencia al ataque de soluciones ácidas.
- Comparación de los resultados obtenidos en las aleaciones propuestas con los de las ligas ofrecidas en el mercado.

2.6 ELABORACIÓN DE LIBRO

Evaluación y análisis de los resultados obtenidos experimentalmente, y elaboración de la tesis la cual incluye conclusiones relevantes y recomendaciones.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La experimentación comprendió el desarrollo de las actividades planteadas en la metodología como se expone a continuación.

3.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS LIGAS COMERCIALES

El desarrollo experimental se inicia con la identificación de las ligas comerciales actuales para oro blanco que se encuentran en el sector joyero de la región, lo que significó conocer cuáles son las que se utilizan en el mercado local y cómo las implementan en los talleres; para este propósito se realizaron visitas a diez empresas, incluyendo proveedores, identificándose las siguientes ligas:

Tabla 3. Ligas presentes en el mercado de la región

LIGAS EN EL MERCADO	PROMEDIO DE VENTA/ MES	PRECIO PROMEDIO	CONSUMO PROMEDIO
PANDORA T15S	5 Kg	\$ 450 / g	Un taller 1 Kg / 3 meses
PROGOLD			
UNITED 880	1 Kg		
UNITED 907			

El promedio de venta de cada una de estas ligas está sujeto directamente a la importación de las mismas, lo que se traduce en que el joyero debe utilizar la liga que se encuentre disponible en el momento para no interrumpir su producción; esto genera inconformidad al no poder trabajar con la liga de preferencia o que se tenga que importar directamente su propia materia prima, situación que lleva al joyero a comprar la cantidad mínima de la presentación del producto, que

generalmente es muy superior a la que está consumiendo en su taller y el material restante debe mantenerlo almacenado.

La importación directa en pequeñas cantidades (una unidad de la presentación del producto) genera sobrecostos en la fabricación en cuanto a fletes y aranceles e incumplimiento con los clientes por el tiempo de envío que generalmente supera los 15 días; incluso las casas productoras se abstienen de vender directamente y remiten a un distribuidor local para que sea éste el que realice la solicitud de la transacción.

El precio promedio por gramo de estas ligas es un factor determinante para la selección de los posibles metales blanqueadores, dado que incluir, así sea en pequeñas proporciones, un metal precioso como paladio o platino incrementaría substancialmente su valor, por ejemplo, si 1 gramo de liga contiene un 10% de paladio (0,1 g) que se encuentra en promedio a \$45.000 /g la liga, incrementaría su valor en \$4.500/g, a esto se debe sumar la escasez de este material en el mercado.

En cuanto a la implementación de estas ligas en los talleres, los productos ofrecen una ficha técnica para su manejo que escasamente se revisa pero no se aplica en su totalidad, debido a que cada operario tiene su manera de trabajar y además es notoria la falta de preparación técnica de los mismos ya que el conocimiento de los diferentes procesos se ha adquirido de manera empírica y la profesión del joyero siempre se ha desarrollado en forma artesanal. A continuación se relacionan algunos de los aspectos principales de estas recomendaciones en la tabla 4.

Tabla 4. Aspectos principales de las fichas técnicas de las ligas comerciales

LIGA	ALOE	
Uso sugerido	Trabajo mecánico	Fundición
T° de fusión	920 °C	1020 °C en máquinas centrífugas 1040 °C en máquinas de vacío con atmósfera controlada
T° molde ligote	150 °C	550-650 °C dependiendo de las dimensiones de la máquina y objetos
Enfriamiento	Rápido agua tibia (40°C)	En agua después de 10 min.
Recocido	620 °C por 20 min, enfriamiento rápido en agua caliente (40°C)	
Peso específico	13.99 g/cm ³	
LIGA	PROGOLD	
Uso sugerido	Trabajo mecánico	Fundición
T° de fusión	970 °C	1020 °C en máquinas centrífugas
	1020 °C	1070 °C en máquinas de vacío con atmósfera controlada
T° molde ligote	150 - 200 °C	500-700 °C dependiendo de las dimensiones de la máquina y objetos
Enfriamiento	Lento al aire hasta 500 °C (cambio a un color oscuro) y luego en agua a 25 °C	
Recocido	750 °C por (1 kilo >) 20 - 25 min, enfriamiento rápido en 50% agua / alcohol	
Peso específico	14.50 g/cm ³	

LIGA	UNITED 880	
Uso sugerido	Trabajo mecánico	Fundición
T° de fusión	1060 °C para premezclar 1010°C	1015 °C
T° molde ligote	No determinado	No determinado
Enfriamiento	Al aire, remojar en solución pickel	
Recocido	Aplicar capa de lumbre con ácido bórico 732 °C 20 min, enfriamiento al aire libre. Termine de enfriar en solución pickel caliente	
Peso específico	No determinado	
LIGA	UNITED 907	
Uso sugerido	Fundición	
T° de fusión	1050 - 1070 °C para alear 1000 - 1020 °C	
T° molde ligote	Calentar ligeramente	
Enfriamiento	No determinado	
Recocido	No determinado	
Peso específico	No determinado	

3.2 ANÁLISIS QUÍMICO POR ABSORCIÓN ATÓMICA

Se realizó el análisis químico por absorción atómica de las aleaciones presentes en el mercado local (Pandora-aloe, United 880, United 907 y Pro-gold), este estudio fue realizado por el laboratorio de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente de la Universidad Industrial de Santander.

Los elementos metálicos fueron cuantificados por medio de un Espectrofotómetro de Absorción Atómica Perkin Elmer 2380 y con patrones certificados de cada elemento. Se tomó un rango entre 0.2 - 0.4 g de las muestras y se les atacó con agua regia, posteriormente se realizó una digestión durante 20 minutos y las soluciones se aforaron a 100 ml en un balón volumétrico de la misma capacidad. Los resultados se muestran en porcentaje en peso en la siguiente tabla:

Tabla 5. Identificación de los elementos presentes en las ligas comerciales

MUESTRAS	% Cu	% Ni	% Zn	% Fe	% Ag	Composición Total
Aloe	55.12	30.12	14.70	0.009	< 0.001	99.95
United 880	56.68	28.61	14.50	0.06	0.002	99.85
United 907	39.92	38.30	19.78	0.01	0.001	98.01
Pro-gold	56.87	30.77	14.82	0.02	< 0.001	102.48

Se resalta del análisis químico que las ligas comerciales estudiadas tienen en su composición los mismos elementos principales (Cu, Ni, Zn), y mantienen proporciones muy similares entre ellos (en promedio 56.22% Cu, 29.83% Ni, 14.67% Zn), distinguiéndose únicamente la aleación united 907 recomendada únicamente para fundición, que plantea porcentajes de Cu y Ni muy similares (39.92% Cu, 38.30% Zn).

En menor proporción está el zinc, como elemento blanqueador secundario se adiciona en una relación cercana a la mitad de la cantidad de Ni agregado, el cual es el elemento principal que aporta la blancura de estas aleaciones. Los otros dos elementos que aparecen en pequeñas proporciones son el hierro y la plata.

En cuanto al hierro, se confirma la adición de éste como elemento que incrementa y mejora la coloración, además, aporta dureza a la aleación agregado en cantidades pequeñas descartándose que su presencia se deba a la utilización de ferro-níquel como materia prima dado que en las aleaciones no se observa una relación directa de la cantidad de Ni y Fe; por ejemplo, en las ligas 880 y 907 de la casa united se nota que en esta última (907) el porcentaje de níquel es de 38,30 y en la 880 es de 28,61 mientras que el hierro es 0.01 y 0.06 respectivamente, sin ajustarse a la siguiente relación: A mayor Ni presente mayor es la cantidad de Fe cuantificado en la aleación.

En relación con los límites permitidos de níquel en artículos que no van a estar en contacto prolongado con la piel (0.05% en peso de la joya) se observa que el porcentaje de éste en cada una de las ligas es superior al mencionado como se analiza a continuación.

Si se toma como base de cálculo 10 g de oro blanco de 750 milésimas, se darían los siguientes resultados:

10 gramos de oro blanco de 750 milésimas contienen

7,5 g de oro puro

2,5 g de liga,

De acuerdo con el porcentaje de níquel reportado en el análisis químico de cada una de las ligas, se tendría este elemento en cantidades apreciables, tal como se observa en la tabla siguiente:

Tabla 6. Cantidad de níquel presente en 10 g de oro blanco

LIGA	(%) NÍQUEL OBTENIDO	CANTIDAD DE Ni (g)/10g ORO BLANCO	% (p/p) DE Ni EN ORO BLANCO
Aloe	30.12	0.753	7.53
United 880	28.61	0.715	7.15
United 907	38.30	0.958	9.58
Pro-gold	30.77	0.769	7.69

Con este ejemplo se puede resaltar que al trabajar con las ligas en estudio, el porcentaje teórico de níquel en la joya estaría por encima de los límites permitidos para un objeto que no estaría en contacto prolongado con la piel.

Sin embargo, estos resultados no son concluyentes para los artículos que estarían en contacto directo y prolongado con la piel, dado que los niveles estipulados por la norma (CE 94/27) se relacionan con el grado de disolución del níquel en una muestra preparada de sudor artificial ($0.5\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{semana}$) y no se puede afirmar que exista una relación entre éste y el porcentaje calculado en el ejemplo anterior, aunque se podría suponer este comportamiento.

Los inconvenientes reportados por los joyeros entrevistados, muestran que uno de los principales problemas se relaciona con la dificultad en la reutilización de los residuos de fundición y de taller como el material que conforma los bebederos, rebabas, limaduras, recortes, etc., situación que no se presenta al trabajar con la aleación tradicional de paladio plata.

El obstáculo en la reutilización de residuos se relaciona directamente con la adición de cinc en estas ligas, debido a que éste pasa a su estado gaseoso a 907°C y esta temperatura es inferior a la necesaria para fundir el oro puro (1064.4°C) en cada una de las ligas; por esta razón, las casas fabricantes recomiendan mezclar material reciclado con material nuevo a fin de no alterar demasiado las propiedades de las joyas terminadas.

3.3 METALOGRAFÍA Y MICRODUREZA DE LAS LIGAS COMERCIALES EN ESTUDIO

Para analizar el estado en el que se ofrecen las ligas presentes en el mercado local, se realizó una revisión de su microestructura y posteriormente la medición de su dureza con el microdurómetro Vickers.

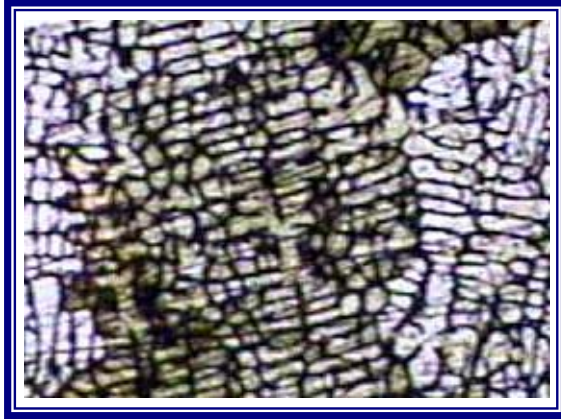
3.3.1 Microestructuras de las ligas comerciales. El primer paso fue el montaje de las granallas en baquelita en la unidad de moldeo METASERV modelo 0190, instrumentación del laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Industrial de Santander (figura 4); posteriormente se realizó su desbaste respectivo y pulimento tomando como referencia la norma ASTM E3-80. La probeta procesada se sometió a un ataque químico de acuerdo con la norma ASTM E407-70, con el fin de revelar la microestructura para así observarla en el analizador de imágenes LEICA Q500MC.

Figura 4. Unidad de moldeo METASERV y baquelita obtenida



Las microestructuras reveladas de las granallas de las ligas comerciales son muy similares, tal como se observa en la figura 5, esto puede deberse a que se encuentran los mismos elementos en su composición (Cu, Ni, Zn, Fe, Ag) y el proceso de fabricación de éstas es equivalente y puede entenderse como un temple ya que el metal es llevado rápidamente desde su estado líquido hasta la granalla sólida como tal.

Figura 5. Microestructuras de las ligas comerciales en el mercado local (aumentado 500 veces).



Liga United 880



Liga Aloe



Liga United 907

En las micrografías de las ligas se observa:

- Un constituyente claro (blanco), en mayor cantidad; debido a que los elementos principales de las ligas son el cobre y el níquel, podemos suponer que esta región corresponde a una solución sólida homogénea en donde su color estará dado por el fuerte efecto blanqueador del níquel. En el

diagrama binario Cu - Ni se observa una solución sólida α en todo el rango de composición.

- Un constituyente oscuro ubicado de forma que en algunas regiones parece delimitar granos de la fase blanca, sin embargo, en su interior se aprecian estructuras de menor tamaño de forma redondeada, lo que hace suponer que sea una fase segregada rica en cinc, hierro y plata. En el diagrama binario Cu - Zn se observa que para la composición de estos dos elementos (aproximadamente 79% Cu - 21 % Zn) en las ligas aloe, united 880 y progold, la tendencia es a formar una solución sólida α ; aunque la liga united 907 tiene una cantidad menor de cobre con respecto al cinc (66.87% Cu - 33.13% Zn) la tendencia es la misma.
- Un constituyente de color café; dado que el constituyente principal de las aleaciones es el cobre, podría suponerse que estas zonas corresponden a una fase rica en este elemento.

3.3.2 Microdurezas Vickers de las ligas comerciales. La medición de la microdureza de las ligas se realizó con el Escleroscopio pequeño Leitz Wetslar del laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Industrial de Santander (norma ASTM E 92 - 82) la instrumentación utilizada se observa en la figura 6; en el ensayo se efectuó un barrido a través de toda la estructura con el fin de determinar un valor promedio para cada liga, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 7.

Figura 6. Escleroscopio Leitz Weslar



Tabla 7. Resultados del ensayo de microdureza de las ligas comerciales

LIGAS COMERCIALES	D promedio en μm	DUREZA HV
Aloe	25.64	140.8
United 880	27.48	122.8
United 907	26.36	134.2
Pro-gold	30.00	104.04

Un valor grande de D en la diagonal de la pirámide representa una mayor penetración en la probeta, lo que se traduce en un material más blando. Para el ensayo se aplicó una carga constante de 50 g para todas las aleaciones. En cuanto a las microdurezas obtenidas se observa que los valores varían significativamente de una liga a otra, en donde la liga que presentó mayor dureza es la liga aloe y la más blanda la liga pro-gold.

3.4 PREPARACIÓN DE ORO BLANCO DE 750 MILÉSIMAS A PARTIR DE LAS LIGAS COMERCIALES

Para la elaboración de la aleación de oro blanco, el joyero adiciona tanto la liga como el oro puro al crisol previamente curado con ácido bórico. El calentamiento se logra con un soplete mezclador y los gases utilizados son oxígeno - acetileno u oxígeno - propano.

Para agilizar el proceso el joyero emplea una llama oxidante, cuando el metal está fundido adiciona ácido bórico para desoxidar; una vez retirados estos óxidos vacía el metal en una lingotera y deja enfriar al aire. Posteriormente, el metal es pasado por la laminadora y como paso final lo pasa por la hilera para obtener el diámetro deseado, 1 milímetro en este caso. En seguida estos alambres, se llevaron al laboratorio para determinar su comportamiento mecánico, como se describe a continuación.

3.5 ENSAYO DE TENSIÓN

El ensayo de tensión se utiliza para evaluar la resistencia de los metales y aleaciones. En esta prueba se realiza hasta que la muestra del metal se rompa en un período de tiempo relativamente corto a una velocidad constante.

Los alambres elaborados anteriormente, de aproximadamente 1mm de diámetro y 50 cm de longitud con las ligas de estudio y la liga tradicional de paladio - plata fueron los utilizados para esta prueba. Es de resaltar la dificultad que implica el trabajar con metales tan costosos como en el caso del paladio, razón por la cual, para esta última liga sólo se obtuvieron dos probetas.

Se realizó un tratamiento térmico de recocido, según la carta técnica de cada liga (tabla 4), con el fin de dar al metal las propiedades finales para que sean comparables con las de una pieza de joyería terminada. A continuación se cortaron alambres con una longitud de 10 cm que fueron llevadas al tensómetro Monsanto del laboratorio de caracterización de materiales de la Universidad. El montaje se muestra en la figura 7 y los resultados de la prueba de tensión se presentan en la tabla 8.

El estado actual del tensómetro Monsanto no permite afirmar que los valores de carga aplicada obtenidos correspondan a los reales, sin embargo, estas lecturas permiten establecer comparaciones de los comportamientos entre las ligas en este ensayo. Para la prueba se utilizó una carga de 100 g con su escala correspondiente.

Figura 7. Montaje de los alambres de la aleación en el tensómetro Monsanto

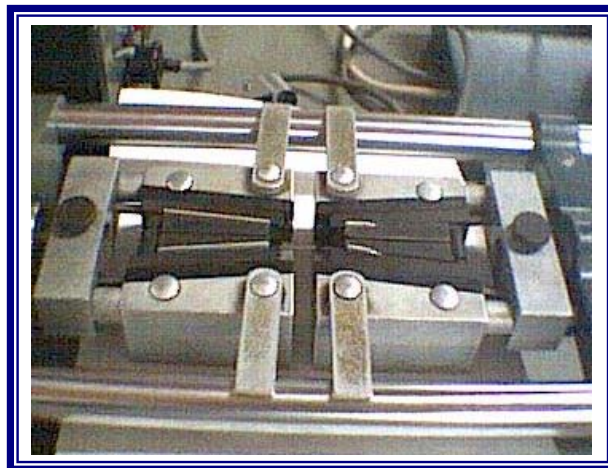


Tabla 8. Resultados del ensayo de tensión en las probetas de oro blanco

ALEACIÓN	MÓDULO DE YOUNG (PSI)	RESISTENCIA MÁXIMA A LA TENSIÓN (PSI)	ELONGACIÓN (%)	REDUCCIÓN DE ÁREA (%)
Au - Aloe	61.42	6.92	4.00	3.84
Au - United 880	45.32	4.15	20.0	16.66
Au - United 907	66.37	5.46	4.38	4.19
Au - Pro-gold	60.64	5.74	11.17	9.99
Au - Ag - Pd	55.03	2.68	1.50	1.48

Los valores de módulo de Young, porcentaje de elongación y de reducción de área se determinaron utilizando las fórmulas (2), (3) y (4) respectivamente. Se resalta que todos los alambres de oro blanco fueron elaborados por deformación mecánica en frío, incluyendo el correspondiente a la liga united 907; de la misma forma, el tratamiento térmico realizado dejó al material en las condiciones correspondientes a las de piezas de joyería terminadas y listas para su uso.

La aleación tradicional de oro blanco elaborada con paladio - plata presentó los valores más bajos de porcentaje de elongación y de reducción de área, lo cual sería muy favorable si su resistencia máxima a la tensión hubiera sido mejor, ya que esto indicaría que una joya elaborada a partir de esta aleación podría ser sometida a grandes esfuerzos sin romperse ni perder su forma original; por el contrario, su valor de resistencia máxima a la tensión fue muy inferior a los resultados de las demás aleaciones estudiadas. El valor de módulo de elasticidad (Young) presentado por la aleación fue el segundo más bajo (55.03) lo que indica que, comparativamente con las aleaciones que presentaron un valor superior, ésta puede ser más fácilmente deformada o presenta una rigidez menor.

Por el contrario, la que presentó mejor comportamiento en este ensayo fue la aleación elaborada con la liga Aloe, soportando gran carga antes de fallar. En cuanto a los valores de los porcentajes de elongación y reducción de área, se observa que su ductilidad fue baja indicando que tuvo poca elongación con una carga aplicada alta, característica importante para los productos de joyería terminados, ya que es ideal que no sufran deformaciones luego de elaboradas.

La aleación elaborada con la liga United 907 presentó un comportamiento similar a la elaborada con la liga Aloe. Aunque la liga United 907 es recomendada únicamente para fundición, no presentó problemas en la elaboración de los alambres dejándose hilar fácilmente, además, los valores obtenidos en la prueba de tensión sugieren que podría trabajarse esta liga en procesos de armado o trabajo mecánico.

Los valores altos en los porcentajes de elongación y reducción de área presentados por las ligas United 880 y en menor proporción la Pro-gold, se refieren a la ductilidad en las joyas terminadas, lo que indicaría la facilidad de deformación de la pieza acabada, característica que puede considerarse como no deseada.

Los módulos de Young o de elasticidad muestran que los metales con alto módulo son relativamente rígidos y no se deforman fácilmente, lo cual sería el caso en este estudio de la liga United 907, lo que corrobora que sea recomendada para fundición. En general, los valores se encuentran en un rango pequeño, destacándose la liga United 880 que mostró la mayor deformación con una carga baja y el menor módulo de elasticidad.

En la figura 8 se muestran las gráficas de esfuerzo - deformación, elaboradas con los resultados del ensayo de resistencia a la tensión con cada una de las ligas en estudio.

Figura 8. Diagramas esfuerzo Vs. Deformación de la aleación de oro blanco con las ligas comerciales

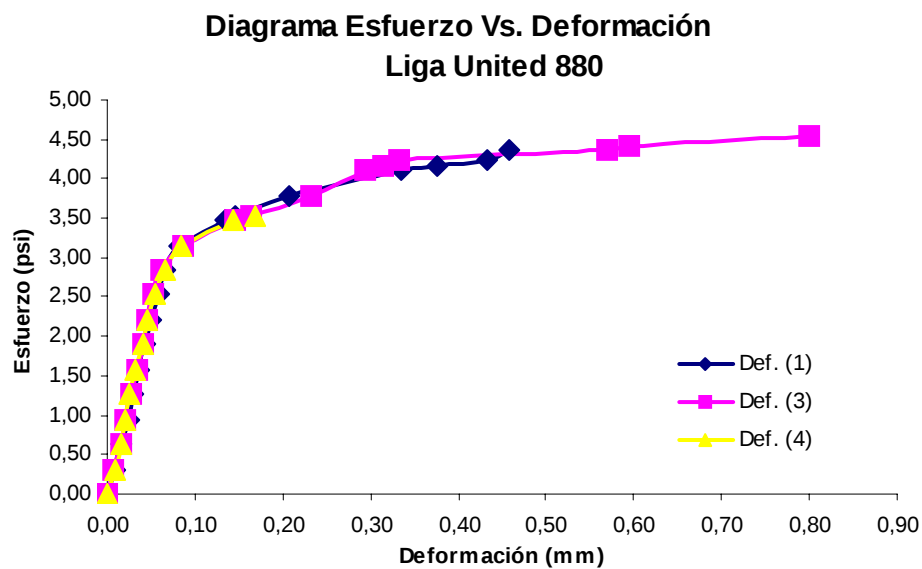
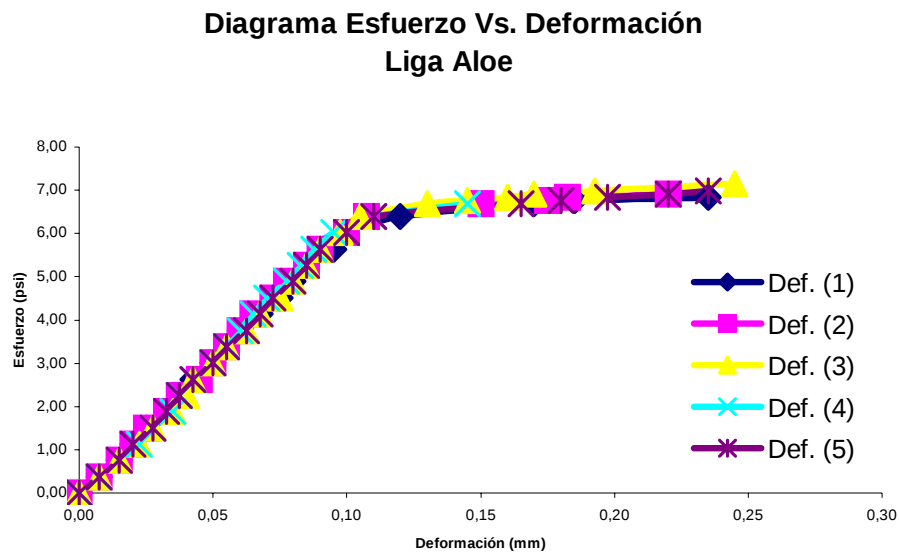


Diagrama Esfuerzo Vs. Deformación
Liga United 907

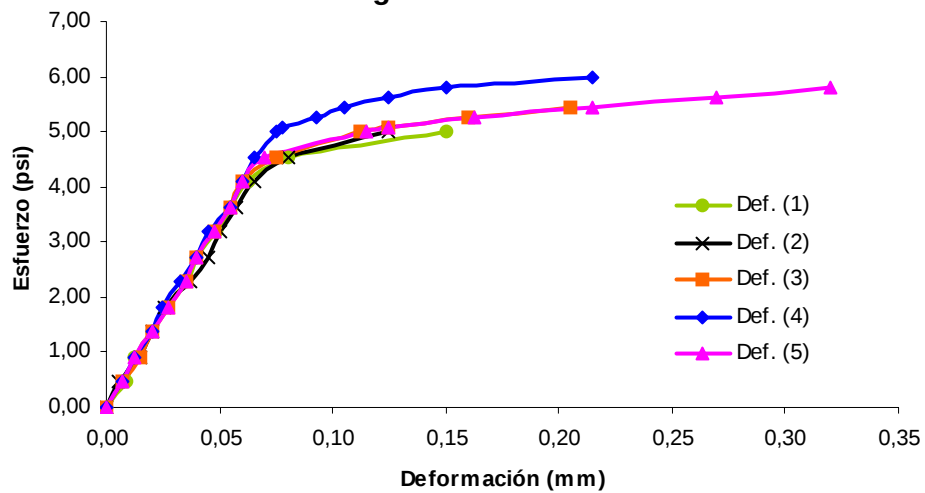
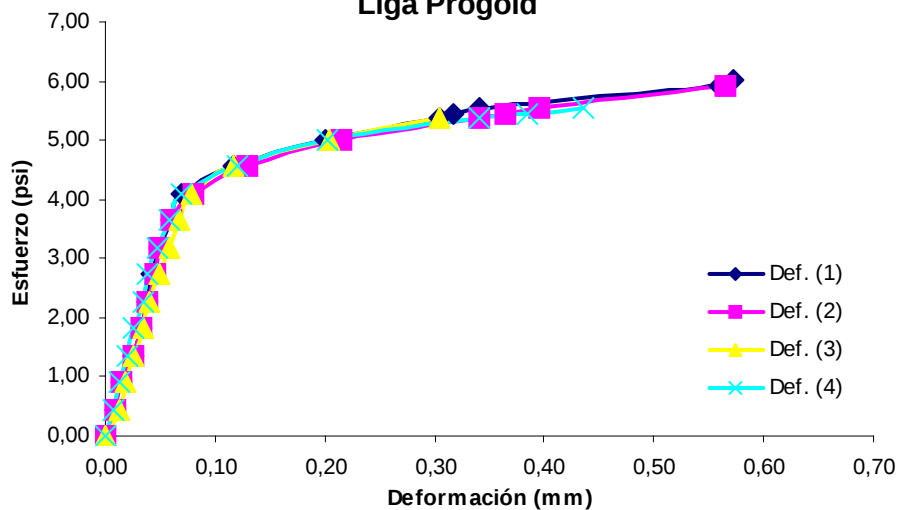
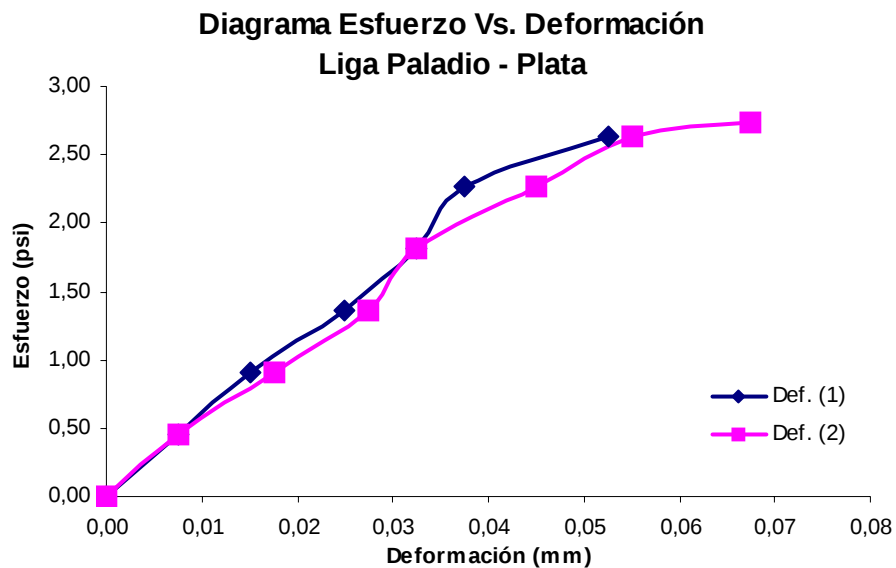


Diagrama Esfuerzo Vs. Deformación
Liga Progold





En los diferentes diagramas de esfuerzo - deformación, se aprecia la reproducibilidad obtenida en los ensayos, lo que indica la precisión y confiabilidad del equipo utilizado para estas mediciones, a excepción de la liga con paladio de la cual sólo se realizaron dos pruebas por las razones ya mencionadas.

Luego de realizar los respectivos ensayos de tensión, se procedió a tomar una muestra de cada uno de los alambres para realizar el análisis metalográfico y determinar su microdureza.

3.6 DETERMINACIÓN DE MICRODUREZAS Y ANÁLISIS METALOGRÁFICO DE LAS ALEACIONES COMERCIALES DE ORO BLANCO

El análisis de las aleaciones de oro blanco de 750 milésimas con las ligas comerciales se realizó con el fin de establecer una base de comparación con las aleaciones a proponer en este proyecto.

3.6.1 Determinación de Microdurezas de las aleaciones comerciales. Para este análisis se tomó una porción de alambre de aproximadamente 5 mm de longitud y 1 mm de diámetro de cada una de las aleaciones de oro blanco, para llevarlas a montaje en baquelita (norma ASTM E3-80) ver figura 4.

El siguiente paso fue el proceso de desbaste y pulido de las probetas, que se realizó usando pasta de diamante de $1\mu\text{m}$ sobre microcloth de 550 a 250 rpm, se aconseja un pulido final utilizando alúmina de $1\mu\text{m}$ a 160 rpm y muy baja presión, seguido por pulido vibratorio con alúmina gamma (500 ml de alúmina en 250 ml de agua destilada). Los resultados de la medición de la dureza Vickers se presentan en la tabla 9; los cuales son el promedio de los valores obtenidos del ensayo por quintuplicado.

Tabla 9. Valores de dureza Vickers de las aleaciones comerciales de oro blanco

ALEACIÓN	D promedio en μm	DUREZA HV
Au - Aloe	16.05	360.62
Au - United 880	15.9	367.90
Au - United 907	18.6	270.60
Au - Pro-gold	17.73	295.33
Au - Ag - Pd	22.37	185.77

Un valor grande de D en la diagonal de la pirámide representa una mayor penetración en la probeta, lo que se traduce en un material más blando. Para el ensayo se aplicó una carga constante de 50 g para todas las aleaciones. Como se observa en la tabla la aleación de oro-paladio-plata corresponde al material más blando y el que presenta mayor dureza es la aleación Au-United 880 con un valor de 367 HV.

En una joya terminada la dureza determina la facilidad con que puede ser rayado el metal, al mismo tiempo se relaciona con el acabado superficial de la misma, dado que un material duro presentará un brillo mas lustroso y duradero; por esta razón se considera que un valor alto en este ensayo es lo más favorable en joyería.

El comportamiento de las aleaciones elaboradas con las ligas estudiadas muestra de mayor a menor grado las ligas que proporcionan dureza al oro: united 880 > aloe > pro-gold > united 907 > Ag-Pd.

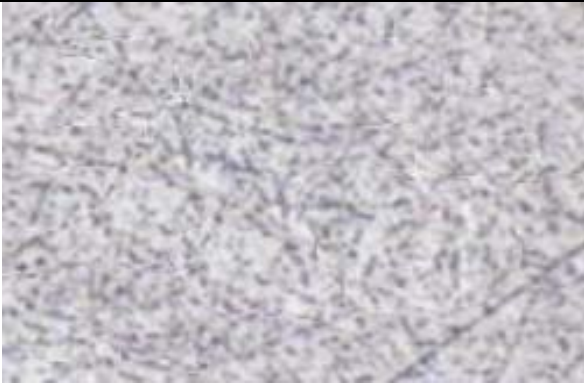
3.6.2 Análisis metalográfico de las aleaciones comerciales. Para el ataque químico se preparó una solución en relación volumétrica 6:5:1 de H_2O , HCl y HNO_3 respectivamente, las muestras fueron sumergidas en esta solución durante 60 segundos (norma ASTM E407-70), pasado este tiempo se detuvo el ataque y se dispuso la probeta en el analizador de imágenes LEICA Q500MC que tiene como fuente de captación el microscopio óptico marca Olympus y una cámara de video a color JVC con software Qwin (figura 9).

Se observó poca reacción (no hubo indicios de microestructuras), por lo que se llevó nuevamente las muestras a la solución para atacarlas por otros 60s. Las microestructuras reveladas se muestran en la tabla 10.

Figura 9. Analizador de imágenes LEICA Q6500MC



Tabla 10. Microestructuras reveladas de las aleaciones de oro blanco de 750 milésimas obtenidas a partir de las ligas comerciales (aumentado 500 veces).

ALEACIÓN	MICROESTRUCTURA
Au - Aloe	
Au - United 880	
Au - United 907	

Au - Progold	
Au - Ag - Pd	

Se observa que la aleación de oro blanco (Au - Aloe) aún presenta una estructura deformada por un trabajo mecánico, por lo que se sugiere que el tratamiento térmico no tuvo el mismo efecto que en las otras aleaciones. En cuanto a la resistencia al ataque de soluciones ácidas es de resaltar que las probetas presentaron gran resistencia, por lo que hubo que someterlas a un segundo período en contacto con la solución recomendada en la norma.

Las microestructuras reveladas son muy similares, no se resalta la aparición de compuestos o de fases bien diferenciadas, la coloración es uniforme en las probetas y sólo se observan puntos oscuros con presencia de zonas amarillentas distribuidas en todas las direcciones.

En los diagramas binarios correspondientes al oro con los metales presentes en las aleaciones estudiadas se observa la tendencia a formar soluciones sólidas, lo que corroboraría lo observado en las micrografías.

3.7 PROPIEDADES DE LOS METALES BLANQUEADORES POTENCIALES

Buscando reducir el número de metales a considerar en este estudio, en la tabla 11 se establece una relación entre los diagramas de equilibrio, identificando la formación de compuestos intermetálicos y de soluciones sólidas a una temperatura de 25°C y en el rango de composición de 0 a 100% en peso.

Tabla 11. Solubilidad de los metales blanqueadores potenciales en el oro

%Peso Au	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0						
Elemento																										
Paladio (Pd)	SOLUCIÓN SÓLIDA																									
Plata (Ag)	SOLUCIÓN SÓLIDA																									
Cromo (Cr)	Au										Au + Cr															
Manganeso (Mn)	Au + Au ₃ Mn		Au ₃ Mn + Au ₂ Mn		Au ₂ Mn + AuMn		AuMn + AuMn ₃		AuMn ₃ + Mn																	
Cobalto (Co)	Au + α-Co																									
Aluminio (Al)				AlAu + Al ₂ Au									Al ₂ Au + Al													
Zinc (Zn)	Au + Au ₃ Zn		Au ₃ Zn + AuZn		AuZn + AuZn ₃		AuZn ₃ + ε		ε + Zn																	
Hierro (Fe)									Au + AuFe ₃		AuFe ₃ + Fe															
Cobre (Cu)																					SOLUCIÓN SOLIDA					Cu ₃ Au
Níquel (Ni)	SOLUCIÓN SÓLIDA HOMOGÉNEA - HETEROGÉNEA																									
Estaño (Sn)	Au + ζ		ζ + AuSn				AuSn + AuSn ₂		AuSn ₂ + AuSn ₄		AuSn ₄ + Sn															

Fuente: BRANDES, E. [7]

- Solución sólida Au - Metal
- Solución sólida Metal - Compuesto intermetálico
- Soluciones Compuesto intermetálico - Compuesto intermetálico

De esta tabla se resalta la solubilidad de los elementos blanqueadores potenciales donde:

- Completa solubilidad en estado sólido representada en la zona azul para: Ag, Ni, Pd, Cu.
- Solubilidad en estado sólido limitada representada en la zona amarilla para: Co, Cr, Fe.
- Solubilidad en estado sólido limitada y formación de fases intermedias representada en la zona verde para: Al, Sn, Mn, Zn.

La característica relevante para escoger los metales de estudio es el efecto blanqueador de cada elemento reportado en la tabla 1, en donde de mayor a menor efecto se ordenarían así: Pd > Pt > Ni > Sn > Zn > Cr > Mn > Fe > Co > Al. De esta lista se descartan Pd y Pt por su alto costo y el Ni por su reacción alérgica con la piel, reduciendo la lista a: Sn > Zn > Cr > Mn > Fe > Co > Al.

A partir de este punto, las consideraciones que se deben tener en cuenta son de tipo teórico, las cuales abarcan las variables que puedan llegar a influir en el comportamiento de los metales en la liga. Algunos de estos factores a considerar son: toxicología, reactividad, temperatura de ebullición, solubilidad (tabla 11) y demás variables relacionadas en las reglas Hume - Rothery.

Considerando el punto de ebullición, el Zn alcanza el estado gaseoso a una temperatura inferior al punto de fusión del oro lo que ocasiona agrietamiento en las piezas terminadas y superficies negras y oxidadas, además que dificulta la reutilización de la liga, por esta razón se considerará sólo como elemento secundario para adicionarlo en pequeñas cantidades. Por otro lado, el estaño

tiene un punto de fusión muy bajo (232 °C), incluso inferior al cinc (420 °C) por lo que al trabajarlo con el oro se sometería a un sobrecalentamiento, a este factor se suma la tendencia elevada a formar compuestos intermetálicos.

De esta forma llegamos a los elementos: Cr > Mn > Fe > Co > Al, como los posibles elementos base o principales de la aleación. Las ventajas y desventajas de cada uno reportadas en estudios, se enumeran a continuación.

3.7.1 El Cromo. La solubilidad del cromo en el oro se aprecia a altas temperaturas pero disminuye cuando ésta decrece, lo cual se puede mejorar adicionando paladio. Existen reportes de aleaciones libres de níquel con base cromo, con composiciones de 6.5% Cr- libre de Pd y 6% Pd-10% Cr- xCu- xAg para oro blanco de 750 milésimas, con sus respectivos estudios de ductilidad en muestras fundidas e hiladas con diferentes tratamientos de temple en agua o enfriamiento en horno. Se expone la necesidad de prevenir las micro estructuras fuera del equilibrio, no homogéneas que aparecen en la solidificación peritética disminuyendo el contenido de cromo a 6,5% aproximadamente o adicionando paladio para permitir mayor contenido de éste. Estos estudios evalúan el color con el sistema CIELAB, encontrándose valores muy cercanos al platino. [8]

El grado de libertad del metal en muestras de la liga fundida, forjada, recocida, se probó por medio de una solución de saliva y sudor artificial dando resultados satisfactorios con una baja velocidad de disolución y sin presencia del peligroso ion hexavalente Cr^{6+} , que es la forma a la cual se le atribuyen efectos dañinos en los humanos. Se ha especulado que los efectos biológicos pueden estar

relacionados con la reducción a cromo trivalente y la formación de complejos con macromoléculas intracelulares.

La exposición al cromo, particularmente en industrias de producción de pigmentos de cromo está asociado con cáncer del tracto respiratorio. El gran riesgo al cáncer es atribuido a la exposición al cromo hexavalente soluble en ácido e insoluble en agua como ocurre en los procesos de refinamiento o calcinación.

Los principales problemas que aparecieron durante la fase de desarrollo y las pruebas industriales reportados en estudios anteriores son los siguientes:

- El cromo reacciona con los crisoles de grafito lo que hace necesario utilizar una cerámica estable o crisoles de cuarzo.
- Las superficies de las aleaciones se oxidan en la fundición o en el recocido y se forma gran cantidad de escoria en el crisol durante la fusión. Esto puede prevenirse fundiendo al vacío o bajo una capa inerte con gas argón; sin embargo, la superficie sigue presentando óxidos que deben ser removidos con pulido final.
- Los estudios reportan que aún queda por superar problemas de producción como el diseño de los sistemas de soldadura, tratamientos térmicos y condiciones óptimas para su fundición.

3.7.2 El manganeso. Desde siempre se ha conocido el uso del manganeso como un agente blanqueador para las aleaciones de oro, sin embargo, pocas aleaciones

de este tipo se han comercializado satisfactoriamente, debido al problema en la fusión y la oxidación causada por la gran reactividad del manganeso con el oxígeno.

Al combinarse el manganeso con el paladio se dan aleaciones considerablemente más estables, suaves y tienen muy buen color blanco, pero se pueden corroer formando una capa muy firme de óxido. Las aleaciones con alta concentración de manganeso pueden ser algo quebradizas, son más susceptibles a la corrosión y reaccionan con el carbono de los crisoles.

Al igual que el cromo, estas aleaciones presentan los mismos inconvenientes para la fusión. El cromo difiere del manganeso por su alto efecto blanqueador y por el incremento de la temperatura de líquido del oro; sin embargo, el manganeso presenta una mejor trabajabilidad.

El manganeso tiene un tiempo de permanencia en el cuerpo de 37 días, es eliminado por la bilis y reabsorbido en el intestino pero la principal ruta de excreción son las heces fecales. La toxicología del manganeso es muy alta en cuanto a la inhalación del dióxido de manganeso; esta causa severas complicaciones pulmonares y llega a afectar el sistema nervioso central.

3.7.3 El hierro. Es un elemento metálico, magnético, maleable y de color blanco plateado, químicamente el hierro es un metal activo. Se combina con los halógenos (flúor, cloro, bromo, yodo y astato y con el azufre, fósforo, carbono y silicio), desplaza al hidrógeno de la mayoría de los ácidos débiles.

En el diagrama binario de oro - hierro se observa una baja solubilidad del hierro en el oro para porcentajes inferiores a 35% Fe y del oro en el hierro para porcentajes inferiores a 5% Fe. No se determina con certeza la aparición del compuesto AuFe_3 (45%Fe); sin embargo, el hierro presenta una ventaja con respecto al cromo y el manganeso, dado que su posición en la serie galvánica es más cercana al oro, lo que reduce la posibilidad de formar par galvánico.

Da carácter ferromagnético a la aleación e incrementa la susceptibilidad a la corrosión; en proporciones sobre el 10% causa excesiva dureza, baja trabajabilidad u oxidación durante la micro fusión. Para mejorar su color y trabajabilidad se adicionan cantidades considerables de paladio.

En cuanto a su toxicología, el hierro es un elemento de difícil eliminación en el cuerpo (0,01% por día) lo que conlleva a su acumulación, presentando problemas cancerígenos relacionados con la población adulta. La entrada del hierro en el cuerpo se da por ingestión o por inhalación, en la bibliografía no se determina dermatitis con el hierro, sin embargo su carácter activo es un factor que debe ser considerado; el hecho de que no se encuentre registro de dermatitis causada por el hierro no implica que no se pueda presentar.

3.7.4 El Cobalto. Es un elemento metálico, magnético, de color blanco plateado, usado principalmente para obtener aleaciones. Tiene poca solidez y escasa ductilidad a temperatura ambiente, pero es dúctil a altas temperaturas.

El efecto del cobalto en el oro blanco está relacionado tanto como blanqueador como para mejorar su trabajabilidad, por otro lado el diagrama binario muestra una alta solubilidad con el oro, sin aparición de compuestos intermetálicos, esto

permite trabajar en composiciones que contengan entre el 5% y el 90% de cobalto, tal como se indica en la tabla 11.

El cobalto ha sido considerado como alergénico (tabla 1), sin embargo, la toxicología del cobalto no se encuentra relacionada con la dermatitis, se vincula principalmente a excesos en su ingestión, dado que es un componente esencial de la vitamina B₁₂. El 80% del cobalto digerido es eliminado por la orina y un 15% restante por las heces fecales. La inhalación de sales de cobalto se relacionan con la industria del cemento y puede causar síntomas respiratorios como resultado de la irritación del tracto pulmonar; la inhalación de vapores de cobalto es muy remoto dado que su temperatura de ebullición es muy alta.

3.7.5 El Aluminio. El aluminio es un metal plateado muy ligero, electropositivo y extremadamente reactivo, al contacto con el aire se cubre rápidamente con una capa dura y transparente de óxido de aluminio que resiste la posterior acción corrosiva, por esta razón, los materiales hechos de aluminio no se oxidan. El metal reduce muchos compuestos metálicos a sus metales básicos, por ejemplo, el aluminio extrae rápidamente el oxígeno del hierro; el calor de la reacción es suficiente para fundir el hierro.

Los estudios muestran que al trabajar en proporciones inferiores al 2% su efecto blanqueador es muy bajo al igual que su trabajabilidad; sin embargo, el diagrama binario Al - Au, muestra que en esta zona se presenta la formación de compuestos intermetálicos (Al₂Au₅, AlAu₂, AlAu) y sólo a porcentajes mayores al 78% se encontrará una solución de Al - Al₂Au. En cuanto a su ubicación en la serie galvánica, la posición del aluminio con respecto al oro es la más desfavorable de todos los metales relacionados anteriormente, aunque factores

como su relativo bajo punto de fusión, su alta velocidad de pasivación, bajo costo y abundancia, hacen del aluminio un metal interesante para tratar en esta investigación.

La toxicología del aluminio, se puede dividir en tres grupos principales, el primero es el relacionado con el efecto de los compuestos de aluminio en el tracto gastrointestinal; el segundo, el efecto de inhalación de compuestos de aluminio (bauxita) y el tercero la toxicidad sistemática del aluminio (fosfatos de aluminio). Su clasificación toxicológica es similar a la del oro.

Los aspectos anteriormente relacionados de cada uno de los metales propuestos para este estudio, deben ser corroborados bajo las condiciones tecnológicas presentes en la región para de esta forma, considerar los factores reales a tener en cuenta en la recomendación de un estudio posterior de alguno de ellos, resaltando que la característica principal, será la coloración final obtenida.

3.8 ESTUDIO DE LAS ALEACIONES DE ORO BLANCO OBTENIDAS CON LOS METALES PROPUESTOS

Como paso inicial en el estudio, se planteó una aleación bifásica de oro con cada uno de los elementos propuestos (Cr, Mn, Fe, Co, Al) en una composición de 75% de oro con 25% del otro metal, los metales utilizados tenían un alto grado de pureza a fin de evitar efectos secundario de otros elementos. Básicamente, el color resultante de este ensayo será la base para la recomendación de la continuidad del estudio de estos metales, debido a que es, en esta composición máxima, que se mide su capacidad para cambiar a color blanco el amarillo intenso del oro puro.

3.8.1 Fundición de los metales. La elección del método para la fundición de las aleaciones es una variable de consideración dado que, aunque se cuenta con una fundidora por inducción al vacío (equipo con atmósfera controlada BCM-1 marca ASEG GALLONE) que alcanza una temperatura máxima nominal de 1200°C, no es posible alcanzar el punto de fusión de los metales puros; sin embargo, al considerar la composición en la que van a trabajar estos metales (25%), los diagramas binarios muestran que la aleación resultante trabajarían con una temperatura considerablemente menor, esto se aprecia más claramente en la tabla 12.

Tabla 12. Comparación entre la temperatura de fusión de los metales puros y la temperatura aproximada de fusión de la aleación

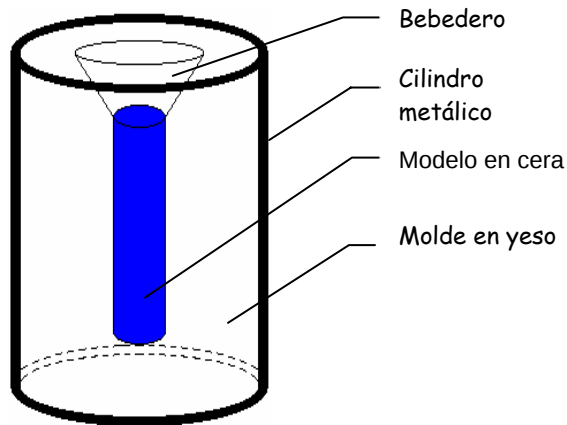
METAL	PUNTO DE FUSIÓN DEL METAL PURO	TEMPERATURA APROXIMADA DE FUSIÓN DE LA ALEACIÓN RESULTANTE 75% ORO - 25% METAL
Cr	1857 °C	1200 °C
Fe	1535 °C	1160 °C
Co	1495 °C	1190 °C
Mn	1244 °C	990 °C

Esta diferencia considerable en la temperatura se trató de aprovechar para realizar las fundiciones en la fundidora con atmósfera controlada del Centro de Desarrollo Productivo en Joyería de Bucaramanga; para este fin, se programó fundir inicialmente el oro y de esta forma solubilizar el otro metal.

Para facilitar el análisis de las aleaciones obtenidas se propuso la elaboración de probetas en forma cilíndrica con un peso total de 5 gramos (3.75g Au - 1.25

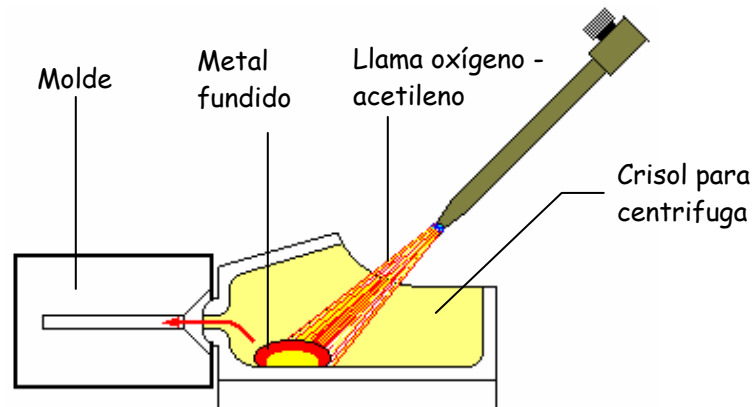
metal) . Para su fabricación se elaboró el modelo en cera para posteriormente hacer el molde en yeso. El sistema completo se muestra en la figura 10.

Figura 10. Descripción del molde para la fundición de las probetas



Este ensayo se aplicó a los metales hierro y cromo; sin embargo, los operarios del equipo manejan una temperatura máxima de trabajo de 1180°C y limitan el tiempo de mantenimiento a esta temperatura para evitar el deterioro acelerado del crisol de grafito. Por esta razón no se logró realizar la fundición en este equipo y se procedió a fundir los metales (Cr, Fe, Co, Mn) en el equipo de centrífuga con combustión de gases oxígeno - acetileno como fuente de calor, tal como se ilustra en la figura 11.

Figura 11. Montaje del equipo de centrífuga en el CDP de joyería de Bucaramanga



El proceso en el equipo de centrífuga se inició con el curado del crisol, en la experimentación se trabajó con un crisol nuevo para evitar impurezas de fundiciones anteriores, por lo cual el curado consistió en la adición de ácido bórico con calentamiento para lograr una capa protectora vidriosa sobre el mismo.

La fundición se empezó con el oro puro, cuando éste se encontró en estado líquido se adicionó el segundo metal para promover la solubilización de los dos componentes, cuando la solución estuvo líquida se desoxidó adicionando ácido bórico. Posteriormente se colocó el molde precalentado en el equipo y se accionó la centrífuga para que el metal fluya hacia el interior del mismo. Para el enfriamiento de las probetas, se retiró el cilindro del equipo de centrífuga y se dejó al aire durante 10 minutos; enseguida, se introdujo en agua con el fin de retirar el yeso que conformaba el molde y así obtener la probeta terminada.

En el caso del aluminio, dado que es considerado un blanqueador débil y está relacionado con un color púrpura brillante al conformar compuestos con el oro

(Al_2Au , 76% Au - 24% Al), se propuso su aplicación en conjunto con otro elemento para conformar una aleación ternaria; en el primer caso se empleó la plata (Au-Al-Ag) debido a que es un metal tradicional para la fundición de oro blanco y en segundo lugar el estaño (Au-Al-Sn), el cual está clasificado en la misma categoría con el cinc con un efecto blanqueador bastante bueno.

Las proporciones de aluminio en el ensayo mencionado se obtuvieron con una fundición previa de cobre, aluminio y plata, a fin de determinar el efecto blanqueador de estos dos elementos en un metal coloreado más económico. Para este fin se realizó un barrido iniciando en 75% Cu - 25% Al hasta llegar a 75% Cu - 25% Ag con intervalos de composición de 5%; de aquí se observó que la composición que presentó mejores resultados en cuanto a color fue 75% Cu - 15% Al - 10% Ag que posteriormente se llevó a prueba con el oro.

Dado que el estaño tiene un mejor efecto blanqueador que la plata y es un metal económico de fácil adquisición, además, que en el diagrama binario Al - Sn se aprecia solubilidad en todo el rango de composición, se planteó la aleación con oro en la misma proporción que la plata (75% Au - 15% Al - 10% Sn). Las aleaciones resultantes y sus fotografías se muestran en las tablas 13 y 14.

Tabla 13. Superficie pulida de las aleaciones resultantes con los metales alternativos sin ataque (aumentado 200 veces).

ALEACIÓN	COLOR
75%Au - 25%Cr 20x	
75%Au - 25%Fe 20x	
75%Au - 25%Co 20x	

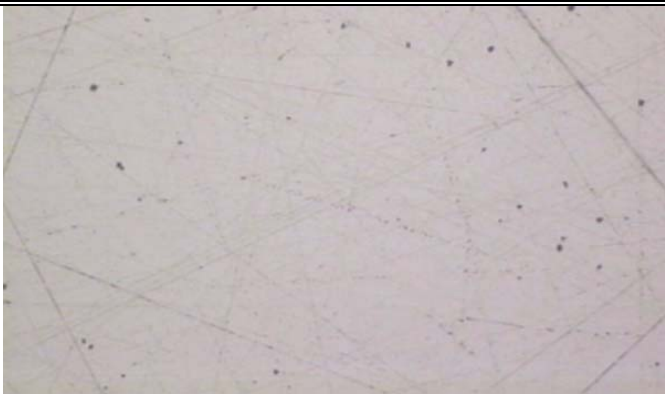
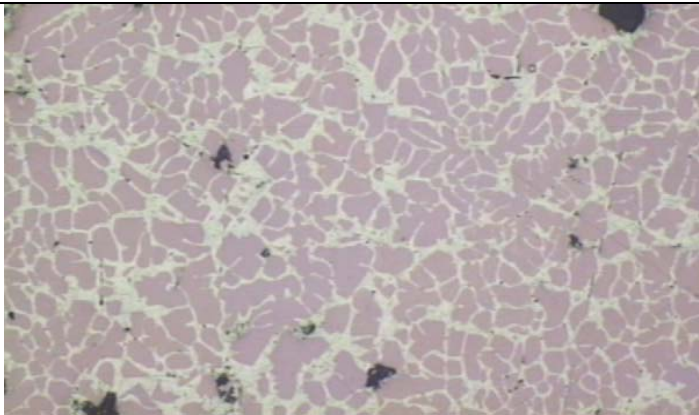
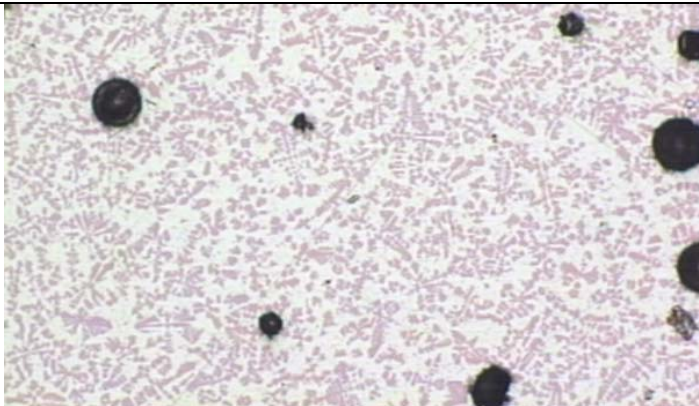
75%Au - 25%Mn 20x	
---------------------------------	--

Tabla 14. Aleaciones ternarias obtenidas con el aluminio

ALEACIÓN	COLOR
75% Au-15% Al-10% Ag 20x	
75% Au-15% Al-10% Sn 20x	

Estas imágenes fueron adquiridas utilizando el analizador de imágenes LEICA Q500MC que cuenta como fuente de captación con el microscopio óptico marca Olympus y una cámara de video a color JVC.

La utilización de este equipo garantiza el mismo nivel de iluminación (ángulo de incidencia e intensidad), el mismo aumento (200 veces) y posición del observador (ángulo y distancia); así mismo se evitó retocar las imágenes y variar la ampliación para su aplicación al texto. De esta forma se establece como variable determinante la coloración obtenida con cada uno de los metales para posteriormente comparar los resultados en cuanto a color con las ligas comerciales y la liga tradicional con plata - paladio.

3.8.2 Determinación de Microdurezas de las aleaciones propuestas. El análisis de las aleaciones de oro con los metales propuestos se hace sobre un corte de cada una de las probetas obtenidas para realizar un montaje en baquelita (norma ASTM E3-80), desbastar y pulir siguiendo el procedimiento descrito en el numeral 3.6.1. Los valores de dureza obtenidos en cada una de las aleaciones que se muestran en la tabla 15, son el promedio de 6 mediciones.

Tabla 15. Dureza de las aleaciones obtenidas con los metales propuestos

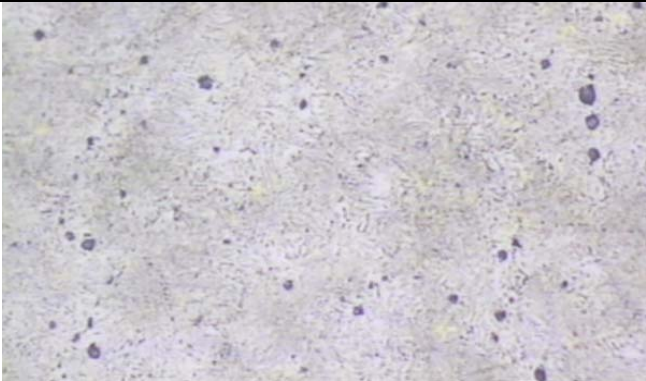
ALEACIÓN	D promedio en μm		DUREZA HV
Au - Cr	16.52		341.22
Au - Fe	16.88		327.12
Au - Co	25.20		145.80
Au - Mn	15.78		373.43
Au - Al - Ag	Fase blanca	13.67	499.33
	Fase púrpura	13.50	551.00
Au - Al - Sn	Fase blanca	15.65	379.65
	Fase púrpura	15.58	383.13

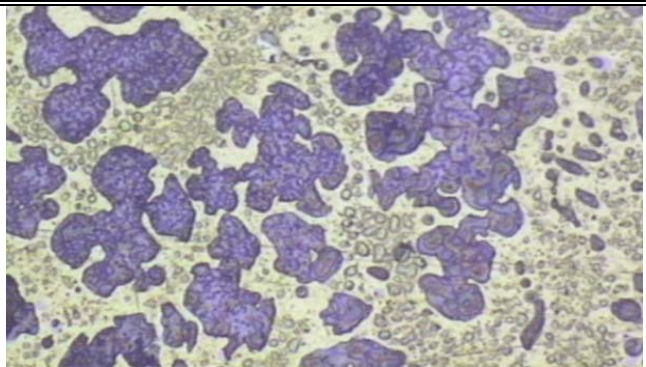
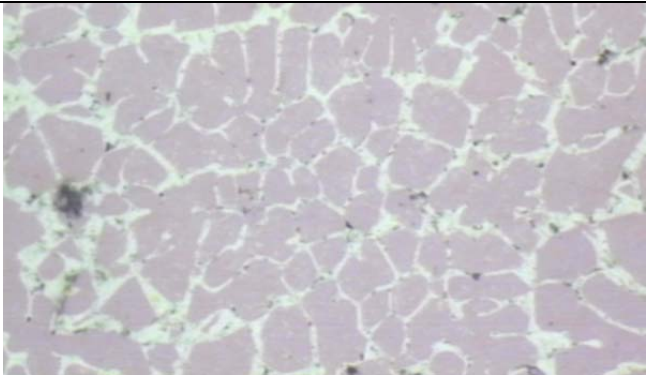
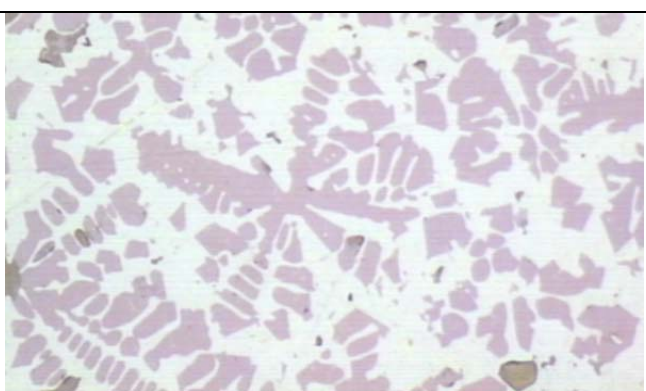
Estos valores de dureza fueron tomados en las probetas sin atacar, por esta razón, en las aleaciones obtenidas con los metales Cr, Fe, y Mn, sólo se apreció una coloración uniforme en toda la probeta; en el caso de las aleaciones con Al - Ag y Al - Sn se observaron dos coloraciones en regiones bien delimitadas, una clara o blanca y otra púrpura por lo que se realizaron mediciones en cada una de ellas mostrando una variación significativa entre sus durezas, en donde la fase púrpura de la aleación Au - Al - Ag presentó el valor más alto de todo el ensayo (551 HV).

En el cobalto también se aprecian dos regiones con coloraciones definidas, una con un amarillo fuerte y otra con tonalidad púrpura muy suave, sin embargo la dureza no cambió de una región a otra por lo que en la tabla sólo aparece un valor.

3.8.3 Análisis metalográfico de las aleaciones propuestas. Para observar la microestructura de las aleaciones obtenidas con los metales propuestos se realizó un ataque químico según la norma (ASTM E407-70). Al igual que con las ligas comerciales se sometieron a dos ataques consecutivos durante 60 segundos cada uno, para obtener un mejor revelado de la estructura. Las imágenes obtenidas se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Imágenes de las microestructuras reveladas de las aleaciones con los metales propuestos (aumentado 500 veces).

ALEACIÓN	MICROESTRUCTURA
75%Au - 25%Cr 50x	
75%Au - 25%Fe 50x	

75%<i>Au</i> - 25%<i>Co</i> 50x	
75%<i>Au</i> - 25%<i>Mn</i> 50x	
75%<i>Au</i> -15%<i>Al</i> -10%<i>Ag</i> 50x	
75%<i>Au</i> -15%<i>Al</i> -10%<i>Sn</i> 50x	

En la imagen correspondiente al Au - Cr se observa un componente de color blanco uniforme, con crecimiento dendrítico y pequeñas ramificaciones rodeado de una matriz oscura. Dado que en esta composición se cruza la línea de solubilidad del cromo en el oro, esta zona blanca puede ser una fase segregada de cromo.

En cuanto a la imagen del Au-Fe, no se diferencian estructuras o regiones, sólo se aprecian diferencias en la coloración, a mayores aumentos se aprecian delgadas líneas oscuras formando ondas no homogéneas y en todas direcciones. En este rango de composición se comienza a disminuir la solubilidad del hierro en el oro.

El sistema Au-Co se presenta una fase púrpura irregular con formaciones redondeadas internas de igual coloración en su interior, rodeadas por una matriz que igualmente presenta formas redondeadas de tonalidad amarillo oscuro en un fondo amarillo claro. En esta composición el oro forma una fase homogénea con el cobalto y el líquido pasa directamente a sólido a una temperatura de 996 °C. El cobalto en la composición utilizada en el ensayo, es altamente soluble y es considerado como refinador de grano.

En la figura del Au-Mn se apreció una fase de color blanco con bordes no muy bien definidos rodeados de una matriz oscura; en esta composición el manganeso forma el compuesto Au_3Mn .

En las aleaciones con aluminio se observa una fase púrpura y una fase blanca, se diferencian en la formación dendrítica presentada por la aleación que contiene Sn que a su vez se encuentra en una proporción menor. La aleación que contiene

plata, es casi completamente púrpura con un crecimiento de grano mayor. La coloración púrpura puede deberse a la presencia del compuesto Al_2Au lo que se corrobora con el aumento de dureza con respecto a la fase blanca.

El análisis de las aleaciones obtenidas se hace partiendo de la composición que se programó (75% Au - 25% metales propuestos); sin embargo, la composición final obtenida sólo puede ser corroborada con las fases presentes en las micrografías.

Se resalta que a pesar que se trabajó con metales que se oxidarían rápidamente al estar expuestos a la acción corrosiva del medio ambiente y a la de los ácidos utilizados para su ataque, las aleaciones obtenidas presentaron gran resistencia dado que a fin de analizar este comportamiento, las probetas no fueron protegidas por ninguna solución desde su pulido final y aún así no muestran indicios de corrosión, picado o cambio de color posterior al ataque mencionado.

3.8.4 Ensayo de maleabilidad de las aleaciones propuestas. El ensayo de maleabilidad de las aleaciones obtenidas con los metales propuestos es de carácter cualitativo y se hace a fin de establecer las condiciones mecánicas preliminares de las mismas; las probetas sometidas a laminación no han sido tratadas térmicamente, es decir, que su comportamiento podría mejorar al variar esta condición y/o con la adición de otros elementos.

La prueba se realizó en la laminadora Mario di Maio del Centro de Desarrollo Productivo de Joyería de Bucaramanga, los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 17. Resultados del ensayo de laminación de las aleaciones de oro con los metales propuestos

ALEACIÓN	LONGITUD INICIAL	DIÁMETRO INICIAL	LONGITUD FINAL	ANCHO	ESPESOR	% REDUCC EN FRIO
Au - Cr	8.4 mm	3.84 mm	8.6 mm	4.90 mm	2.8 mm	27.08 %
Au - Mn	32 mm	3.05 mm	48 mm	5.25 mm	1.12 mm	63.28 %
Au - Co	26 mm	4.50 mm	121 mm	6.85 mm	0.3 mm	93.30 %
Au - Fe	9.1 mm	4.33 mm	11.2 mm	5.8 mm	1.5 mm	65.36 %

Teniendo en cuenta el porcentaje de reducción en frío, la aleación que presentó mejor comportamiento en el ensayo de laminación fue la obtenida con cobalto, seguida por el hierro y el manganeso, sin embargo, si se observa la variación mostrada en todas las dimensiones de la probeta se apreciará que el comportamiento del manganeso fue superior al del hierro; sumado a esto, la aleación de hierro se fracturó fácilmente durante la prueba al igual que la aleación de cromo. La ilustración del ensayo se muestra en la figura 12.

Figura 12. Probetas deformadas en el ensayo de maleabilidad de las aleaciones con los metales propuestos



Aleación 75% Au - 25% Co



Aleación 75%Au - 25%Fe



Aleación 75%Au - 25%Cr



Aleación 75% Au - 25% Mn

4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados se centra en la comparación de la coloración obtenida a partir de los metales blanqueadores propuestos y de las ligas comerciales.

4.1 EVALUACIÓN DEL COLOR DE LAS ALEACIONES COMERCIALES Y PROPUESTAS

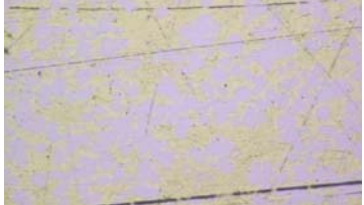
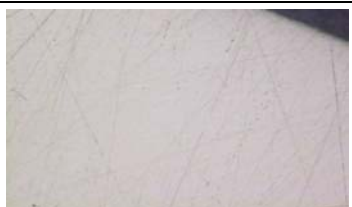
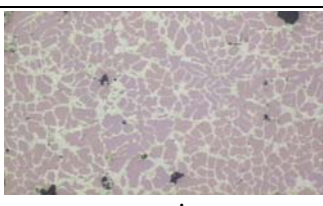
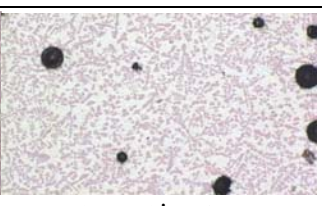
El color es considerado como una propiedad determinante en el momento de proponer metales para la obtención de oro blanco de 750 milésimas, por esta razón y por la instrumentación especializada requerida para la aplicación del sistema CIELAB (que no se encuentra en el país), se hace necesario implementar otra técnica que permita comparar los colores logrados en las aleaciones con los metales blanqueadores planteados y las ligas comerciales.

Para este fin, se deben considerar las variables que influyen en la percepción del color, como el nivel de iluminación y su ángulo de incidencia sobre la superficie del metal, además de la distancia y posición del observador. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó un registro con el analizador de imágenes referenciado anteriormente de la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander, manteniendo constantes las variables especificadas.

De esta forma, se plantea una alternativa para que los valores registrados correspondientes al sistema RGB utilizado por el equipo, puedan ser relacionados por medio del programa matlab para así obtener un valor comparable con el plano cartesiano utilizado por el sistema cielab.

La serie de imágenes adquiridas de las superficies de las probetas sin atacar de las aleaciones de oro blanco tanto de las ligas comerciales como las desarrolladas con los metales alternativos, se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Evaluación del color del oro blanco con las ligas comerciales y los metales en estudio en las probetas sin ataque químico

LIGAS COMERCIALES	METALES PROPUESTOS
 Au - Aloe	 Au - Cr
 Au - United 880	 Au - Fe
 Au - United 907	 Au - Co
 Au - Progold	 Au - Mn
 Au - Ag - Pd	 Au - Al - Ag  Au - Al - Sn

En la tabla anterior se plantea un paralelo entre los colores obtenidos de las aleaciones desarrolladas con los metales propuestos y con las ligas comerciales, incluyendo la aleación tradicional Au -Ag - Pd.

Para establecer el mejor punto de comparación, se realiza una clasificación de las ligas comerciales de menor a mayor color blanco obtenido, recordando que las tonalidades hacia otros colores no son lo deseado. De esta forma, la tonalidad fucsia obtenida con las ligas aloe y united 907 las ubican en los últimos lugares, seguidas por la tonalidad oscura de la aleación tradicional con Pd - Ag; restando las aleaciones desarrolladas con las ligas pro-gold y united 880 de donde se resalta la tonalidad más blanca y clara de esta última, dejando la selección de la siguiente forma: aloe < united 907 < Pd - Ag < progold < united 880.

Igualmente se procede a realizar la misma clasificación con las aleaciones obtenidas con los metales propuestos en este estudio. Claramente se observa la coloración amarilla obtenida con cobalto por lo cual se ubicaría en el último lugar, seguido por la tonalidad púrpura oscura de la aleación con Al - Ag.

Las aleaciones obtenidas con los metales Fe y Mn mantienen una gran similitud, sin embargo, el primero aparece levemente más oscuro; la aleación con Al - Sn presenta una tonalidad ligeramente púrpura resaltándose su matriz blanca clara por lo que estaría mejor ubicada que la aleación con cromo con la cual se obtuvo una coloración blanca oscura; el ordenamiento de menor a mayor color blanco queda de la siguiente manera: Co < Al - Ag < Fe < Mn < Cr < Al - Sn

La coloración obtenida con Al - Sn se conoce comúnmente como blanco plateado mientras que la coloración obtenida con la liga united 880 y el metal propuesto

Cr son llamadas como blanco grisáceo; aunque este color es considerado por los joyeros como el ideal o el más similar al obtenido con platino, se recubre con un baño de rodio para lograr el llamado blanco comercial que es muy similar al blanco plateado.

La comparación entre los resultados del análisis químico de las ligas comerciales y los resultados del análisis del color muestran una relación directa entre el porcentaje de hierro y la coloración blanca; este comportamiento se ilustra en el siguiente esquema, donde se relaciona cada liga con su respectivo contenido de hierro.

Tabla 19. Relación entre el contenido de hierro y color de las ligas comerciales

Más blanco	Mayor porcentaje de hierro
United 880	0.06
Pro-gold	0.02
United 907	0.01
Aloe	0.009
Menos blanco	Menor porcentaje de hierro

Analistas del tema han planteado que las investigaciones deben encaminarse a desarrollar mejores recubrimientos y no perder el tiempo en trabajar con ligas; sin embargo, la necesidad de mantener una coloración blanca debajo de estos recubrimientos y la demanda por una joyería fina de oro blanco, que aún después de mucho tiempo de uso siga manteniendo su color, estimulan y promueven un sinnúmero de estudios encaminados a encontrar una aleación que cumpla con las

condiciones anteriores y que de igual forma no reaccione o cause alergias con la piel, mantenga buenas propiedades mecánicas, con una temperatura de fusión inferior a los 1200°C , que tenga buena soldabilidad, que permita ser reutilizada sin problemas y de bajo costo.

CONCLUSIONES

- Los metales manganeso, hierro y cromo mostraron un efecto blanqueador bueno en el oro, sin embargo, se debe tener en cuenta que para ampliar su estudio es necesario contar con equipos que alcancen temperaturas superiores a los 1300°C y condiciones de atmósfera controlada, al igual que los recubrimientos y crisoles adecuados, para evitar su reacción con el oxígeno.
- Las aleaciones con aluminio presentan una alternativa económica y sin limitaciones causadas por altos puntos de fusión o alta reactividad con los crisoles; se destaca la coloración de la aleación obtenida con aluminio - estaño aunque se debe considerar, en un estudio posterior con este metal, la utilización de tratamientos térmicos para mejorar su comportamiento mecánico.
- Se resalta el efecto blanqueador de la adición de estaño en el aluminio, en comparación con la adición de plata en las mismas proporciones en la aleación elaborada en este estudio.
- De acuerdo con el estudio exploratorio realizado del efecto blanqueador de los metales propuestos y teniendo en cuenta ésta como característica principal, se descarta el Cobalto como metal blanqueador del oro.

- En el ensayo de maleabilidad, las aleaciones propuestas con los metales cobalto y manganeso presentaron un mejor comportamiento; sin embargo, sólo con el manganeso se obtuvo buena coloración.
- De la composición elemental de las ligas encontradas en el mercado local, se resalta que contienen una gran cantidad de níquel, situación que contrasta con las exigencias internacionales, por esta razón se hace importante la implementación de normas en el sector joyero que protejan tanto a productores como consumidores.
- El alto costo del paladio descarta la posibilidad de incluirlo en un estudio posterior con miras a desarrollar una liga comercial; además que su escasez dificultaría su adición como metal sustituto del níquel.
- Se debe considerar que la coloración y el comportamiento mecánico obtenido con la aleación tradicional de paladio - plata no fue superior al mostrado por las otras ligas comerciales, sumado a esto se da que dicha aleación también debe ser recubierta por un baño de rodio.
- La composición de las ligas united 880, pro-gold, aloe y united 907 es muy similar en sus elementos Cu - Ni - Zn, sin embargo, la liga united 880 tiene los valores más bajos de Ni y Zn que son los principales elementos blanqueadores, a pesar de esto se destacó al presentar la mejor coloración, lo que puede deberse al efecto blanqueador adicional del hierro el cual se encuentra en mayor proporción (0.06%) en esta liga.

- En cuanto al ensayo de tensión, la liga aloe fue la que presentó mejor relación entre módulo de elasticidad, resistencia máxima a la tensión y porcentajes de deformación, contrastando con la united 880 la cual mostró el comportamiento más desfavorable; lo contrario se aprecia en el análisis del color, en donde la liga united 880 se clasificó como la del mejor blanco y la aloe como la de tonalidad menos recomendada lo que lleva a afirmar que se sacrifica trabajabilidad para ganar color.
- El comportamiento mecánico de las aleaciones obtenidas con los metales alternativos, no es concluyente, debido a las dificultades tecnológicas presentadas en el proceso de fundición; este aspecto debe ser mejorado para obtener probetas adecuadas para los diferentes ensayos lo que implica mayor inversión en materia prima, equipos y materiales especiales.
- Las coloraciones obtenidas llevan a resaltar los siguientes metales como los posibles sustitutos del níquel y el paladio en las aleaciones de oro blanco de 750 milésimas: aluminio - estaño, hierro y manganeso.
- La investigación tiene un carácter exploratorio y se ha planteado como una fase inicial de reconocimiento que servirá como base para estudios posteriores más amplios con cada uno de los metales recomendados.

RECOMENDACIONES

- Se debe hacer un estudio detallado de las normas internacionales que regulan el contenido de níquel y de otros elementos perjudiciales para la salud y promover su implementación en la joyería de Santander; resaltando la necesidad de analizar las ligas comerciales que se manejan en el mercado local .
- Se resalta la necesidad de adquirir bibliografía técnica actualizada relacionada con la joyería y el trabajo con metales preciosos, así como su relación con los metales en general, para que de esta manera se inicie una línea de investigación específica en este tema, ya que este sector es de gran importancia en el desarrollo y progreso de la región.
- El estudio del desarrollo de nuevas aleaciones sin elementos perjudiciales para la salud y con nuevas coloraciones para su aplicación en la joyería es un tema muy actual y en el cual se están haciendo grandes inversiones a nivel mundial; por esta razón, se recomienda y se invita a continuar con estos estudios con el fin de impulsar el sector joyero de Santander.
- Se debe considerar la adquisición de un equipo de fundición que alcance temperaturas superiores a los 1300°C, con atmósfera controlada, posibilidad de trabajar con crisoles de materiales diferentes al grafito y de diferentes capacidades; de esta forma se podrá trabajar cualquier metal sin ningún impedimento o complicación.

- Los resultados obtenidos en el estudio del efecto blanqueador de metales alternativos en el oro, muestra que es importante ampliar la investigación, por separado, de cada uno de los siguientes metales: hierro (Fe), manganeso (Mn), aluminio (Al) - estaño (Sn) y cromo; a fin de determinar que elementos pueden trabajar conjuntamente para mejorar sus comportamiento mecánico.
- Se deben hacer esfuerzos para establecer relaciones de cooperación mutua con universidades e instituciones especializadas en el estudio de temas relacionados con los metales preciosos y la joyería; de esta forma se puede avanzar rápidamente en la tecnificación del sector y la creación de la identidad de la joyería de Santander.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] POLIERO, Massimo. White gold alloys for investment casting. En : Gold Technology. Milán. No 31; (Spring 2001); p. 10-20.
- [2] CRETU, Cristian. Coloured gold alloys. En : Gold Technology. Milán. No 30; (Winter 2000); p. 31-40.
- [3] MERCK. Tablas para el laboratorio. s.p.i. p. 19-25.
- [4] _____. Gran Diccionario de las Ciencias ilustrado en color : Síntesis aditiva de los colores. Bogotá : Latinoamericana, 1993. v.2, p. 220.
- [5] ROTHERAM, Peter. White golds - Meeting the demands of international legislation. En : Gold Technology. Milán. No 27; (Noviembre 1999); p. 34-40.
- [6] SMITH, F. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. 2 ed. Madrid : Mc Graw Hill, 1993. p. 257-342.
- [7] BRANDES, Eric. Smithells metal reference book. 6 ed. England : Butterworths, 1983. p. 11(8)-11(358).
- [8] GRIMWADE, Mark. The 15th Santa Fe symposium on jewellery manufacturing technology. En : Gold Technology. Milán. No 33; (Winter 2001); p. 18-25.

BIBLIOGRAFÍA

ALCINA B, J. Los metales en la joyería moderna. 2 ed. Barcelona : s.n., 1989. p. 65-124.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING & MATERIALS. Standard test methods for tension testing of metallic materials. Philadelphia : ASTM, 1991. v.3.01, p.146-160. (ASTM E 8M-90a)

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING & MATERIALS. Standard test methods for Vickers hardness of metallic materials. Philadelphia : ASTM, 1991. v.3.01, p.260-268. (ASTM E 92-82)

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING & MATERIALS. Standard test methods for macroetching metals and alloys. Philadelphia : ASTM, 1991. v.3.01, p.444-453. (ASTM E 340-87)

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING & MATERIALS. Standard test methods for microetching metals and alloys. Philadelphia : ASTM, 1991. v.3.01, p.516-533. (ASTM E 407-70)

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING & MATERIALS. Standard test of preparation of metallographic specimens. Philadelphia : ASTM, 1991. v.3.01, p.82-86. (ASTM E 3-80)

ASM HANDBOOK : Properties and selection nonferrous alloy and special purpose materials. 10 ed. USA : ASM, 1990. v.2, p. 1233-1262.

BAGNOUD, P. Nickel allergy : The European directive and its consequences on gold coatings and white gold alloys. En : Gold Technology. Milán. No 18; (Abril 1996); p. 11-19.

BEER, F. Mecánica de materiales. 2 ed. Bogotá : Mc Graw Hill, 1995. p. 39-111.

CORTI, Christopher. The European directive on nickel in jewellery. En : Gold Technology. Milán. No 29; (Summer 2000); p. 32-34.

CORTI, Christopher. What is a white gold?. En : Gold Technology. Milán. No 36; (Winter 2002); p. 35.

CHANG W, Louis. Toxicology of metals. New York : CRC press, 1996. p. 253-273, 289-295.

DABALÁ, M. Production and characterization of 18 carat white gold alloys conforming to European directive 94/27 CE. En : Gold Technology. Milán. No 25; (Abril 1999); p. 29-31.

GREAVES, Richard. Metalografía microscópica práctica. Bilbao : Urmo, 1966. p. 19-67, 174-208.

GRIMWADE, Mark. Basic metallurgy for goldsmiths. En : Gold Technology. Milán. No 2; (Junio 1990); 22p.

GRIMWADE, Mark. Environmental effects on gold alloys and their resistance to tarnishing and corrosion. En : Gold Technology. Milán. No 9; (Mayo 1993); p. 13-17.

GRIMWADE, Mark. The 14th Santa Fe symposium on jewellery manufacturing technology. En : Gold Technology. Milán. No 30; (Winter 2000); p. 23-30.

GRIMWADE, Mark. The Santa Fe symposium on jewellery manufacturing technology. En : Gold Technology. Milán. No 8; (Noviembre 1992); p. 2-8.

GRIMWADE, Mark. The Santa Fe symposium on jewellery manufacturing technology. En : Gold Technology. Milán. No 12; (Abril 1994); p. 12-19.

JORDENS, Z. Metalurgia no ferrosa. s.l : Limusa, 1984. p. 9-47.

METALS HANDBOOK. Metallography, structures and phase diagrams. 8 ed. Ohio : American society for metals, 1973. v.8, p. 252-274.

METALS HANDBOOK. Properties and selection : Nonferrous alloys and pure metals. 9 ed. Ohio : American society for metals, 1979. v.2, p. 679-825.

METALS HANDBOOK. Properties and selection of metals. 8 ed. Ohio : American society for metals, 1961. v.1, p. 1173-1195.

MONDOLFO, L. F. Aluminum alloys : Structure and properties. Boston : Butterworths, 1976. p. 376-379.

NEELY, John. Metalurgia y materiales industriales. México : Limusa, 2000. p. 67-103, 219-229.

OTT, Dieter. Effect of small additions and impurities on properties of carat golds. En : Gold Technology. Milán. No 22; (Julio 1997); p. 31-38.

OTT, Dieter. Investment casting of gold jewellery. En : Gold Technology. Milán. No 7; (Junio 1992); 31p.

OTT, Dieter. Metallography of gold and gold alloys. En : Gold Technology. Milán. No 33; (Winter 2001); p. 6-11.

OTT, Dieter. Optimizing gold alloys for the manufacturing process. En : Gold Technology. Milán. No 34; (Spring 2002); p. 37-44.

RAPSON, William. The metallurgy of the carat gold alloys. En : Gold Technology. Milán. No 4; (Mayo 1991); p. 16-22.

RAYKHTSAUM, G. Nickel release test - How well do they work. En : Gold Technology. Milán. No 32; (Summer 2001); p. 2-6.

RAYKHTSAUM, G. The color of gold. En : Gold Technology. Milán. No 22; (Julio 1997); p. 26-30.

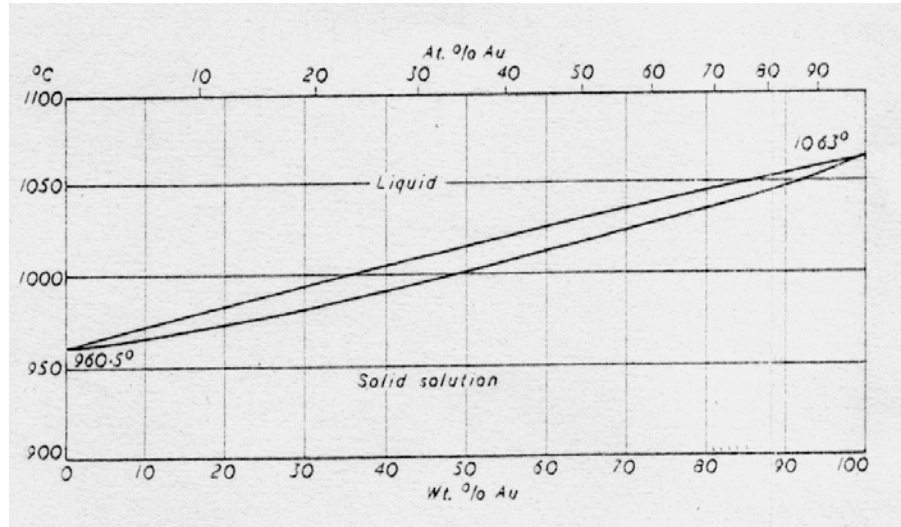
RUSHFORTH, Roy. Don't let nickel get under your skin - The European experience. En : Gold Technology. Milán. No 28; (Spring 2000); p. 2-10.

VANDER V, George. *Metallography : Principles and practice*. New York : McGraw Hill, 1984. p. 75-138.

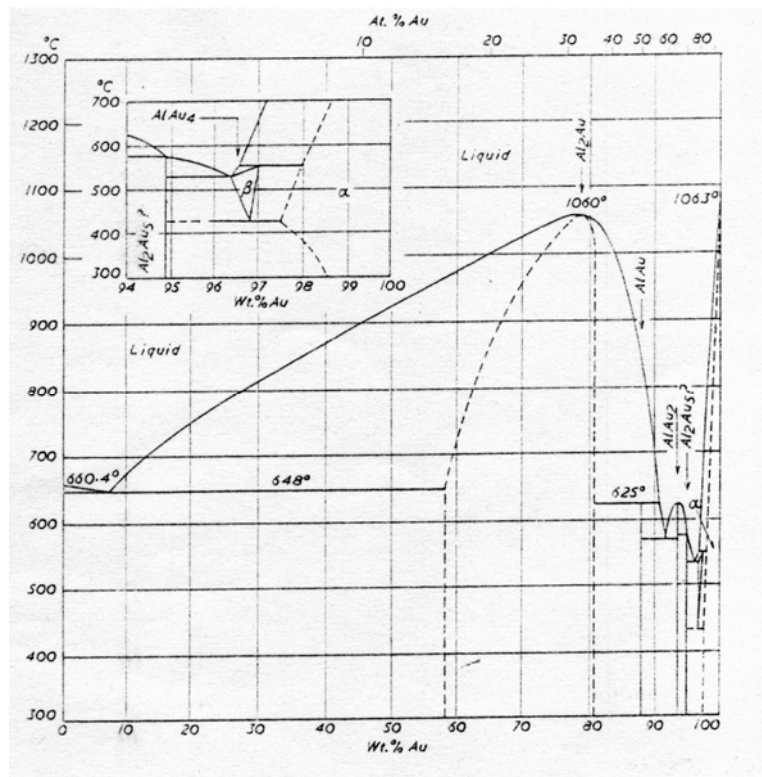
WISE, Edmund. *Gold : Recovery, properties and applications*. New York : D. Van Nostrand, 1964. p. 97-153, 260-271.

ENLACE RECOMENDADO: www.gold.org

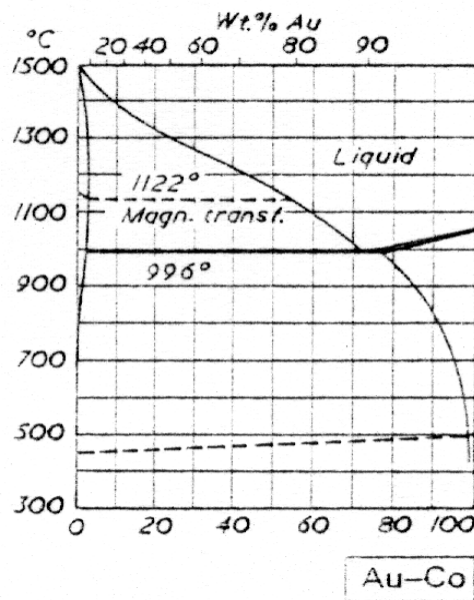
ANEXO. DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO



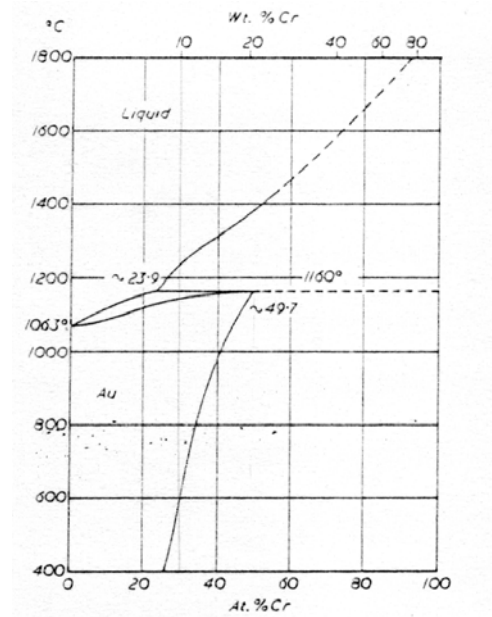
Au - Ag



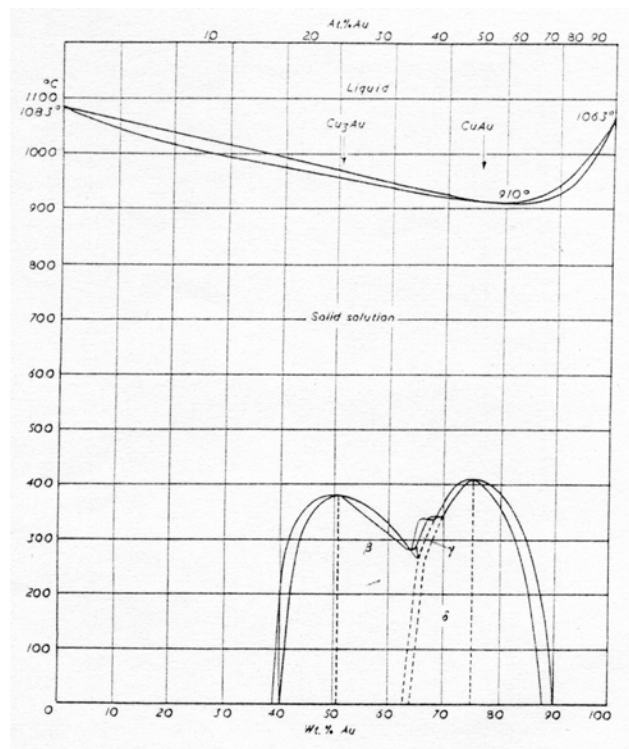
Au - Al



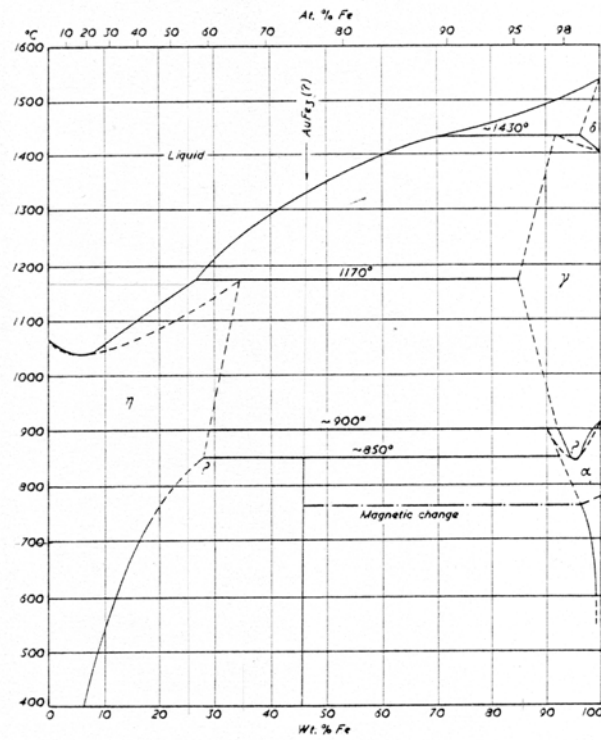
Au - Co



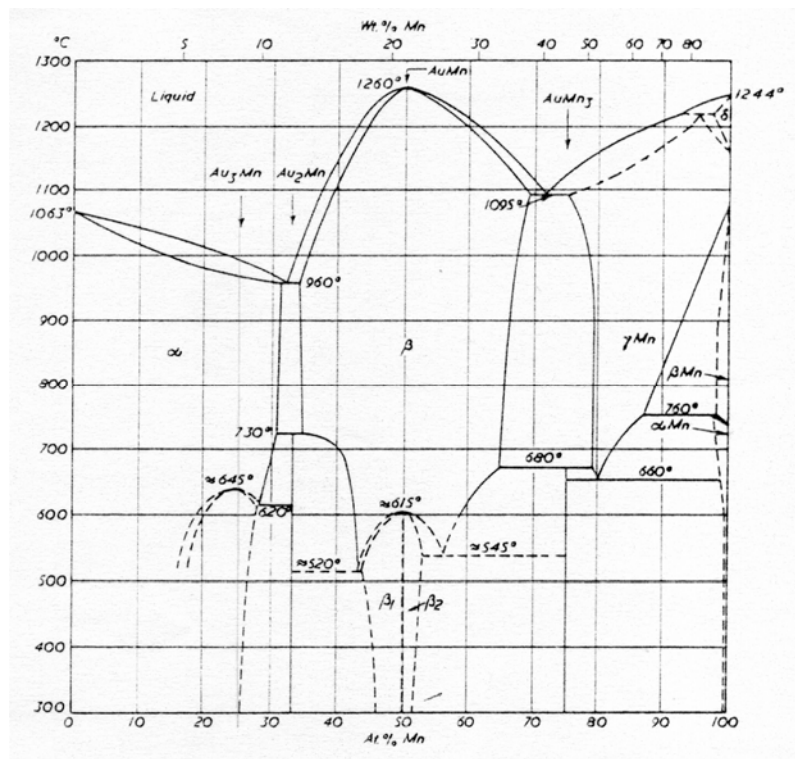
Au - Cr



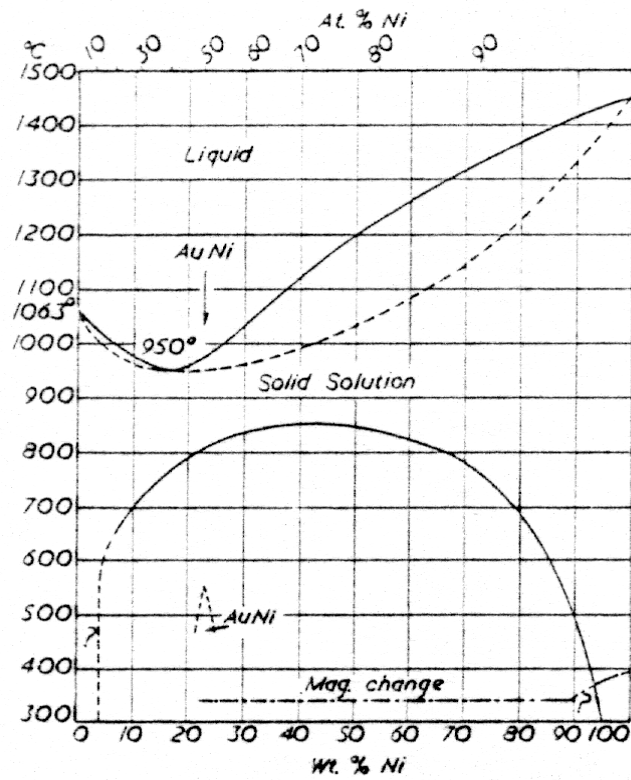
Au - Cu



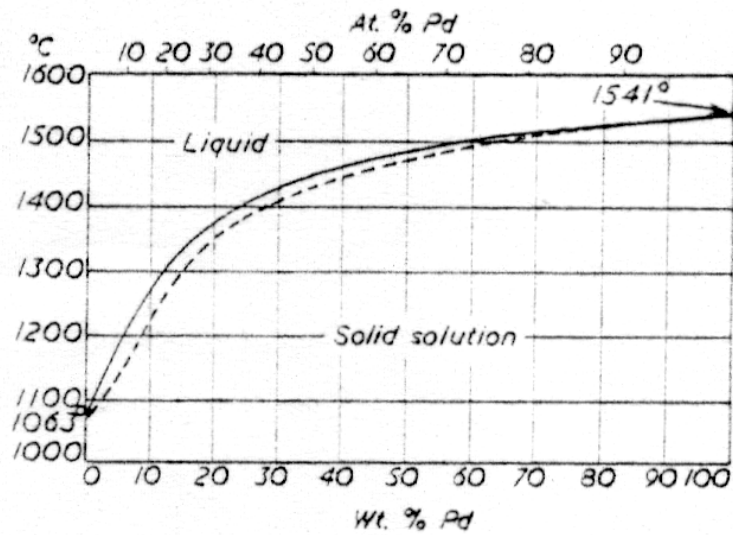
Au - Fe



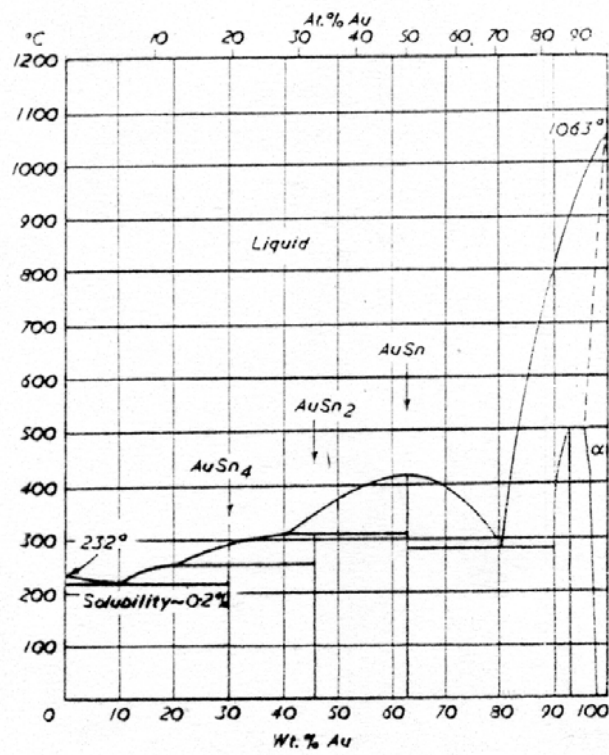
Au - Mn



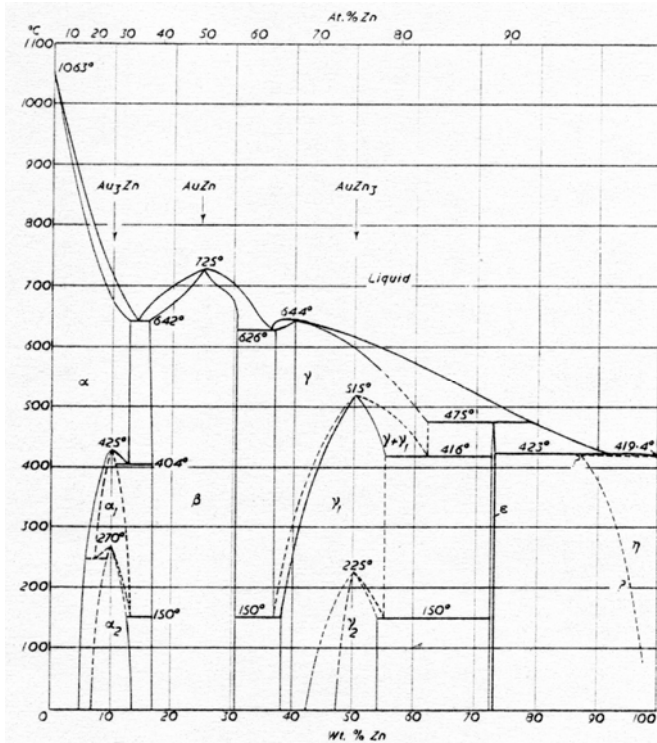
Au - Ni



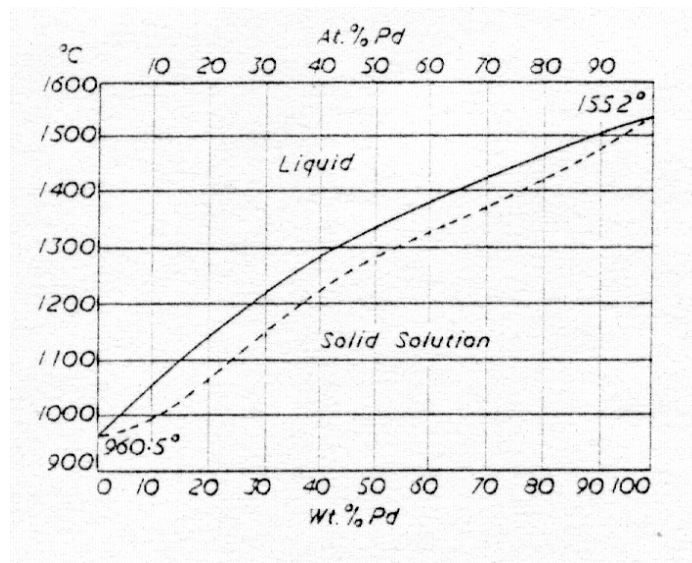
Au - Pd



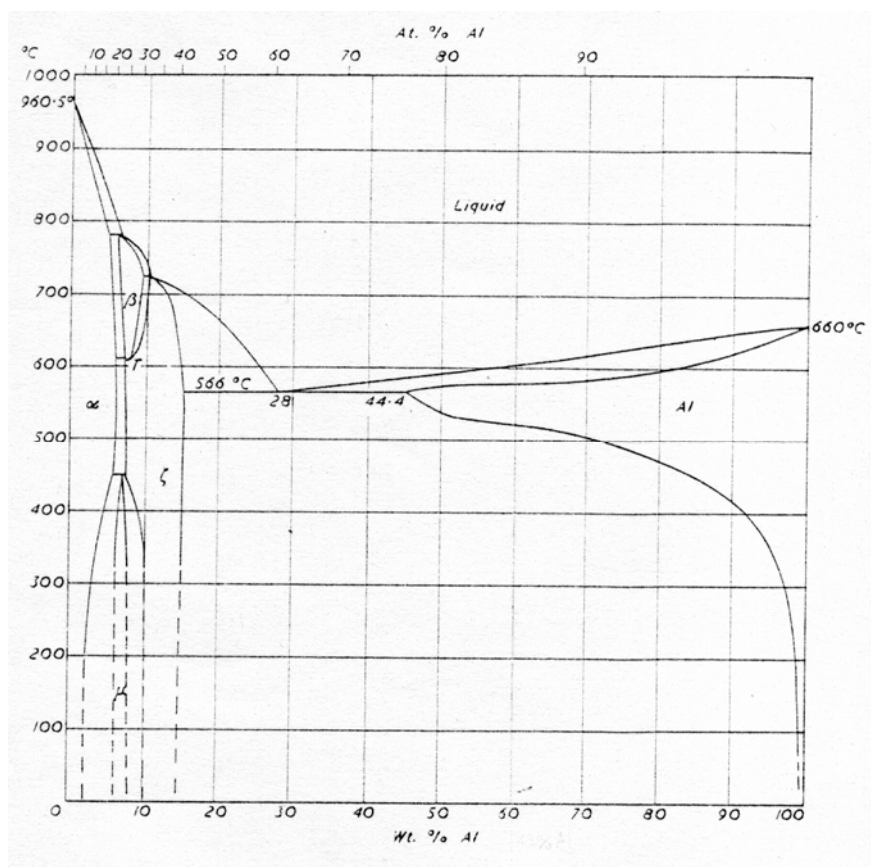
Au - Sn



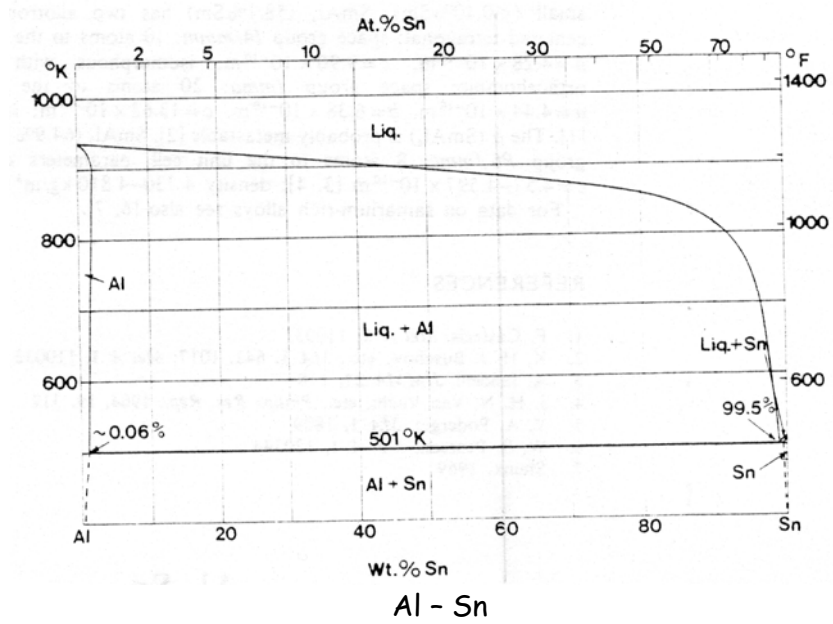
Au - Zn



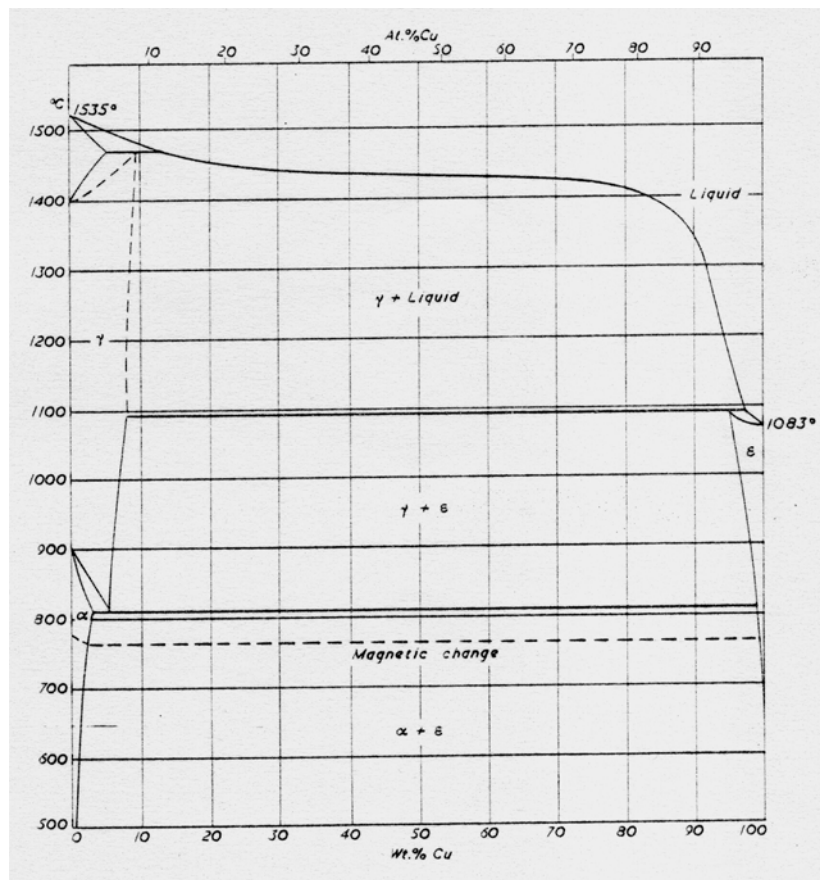
Ag - Pd



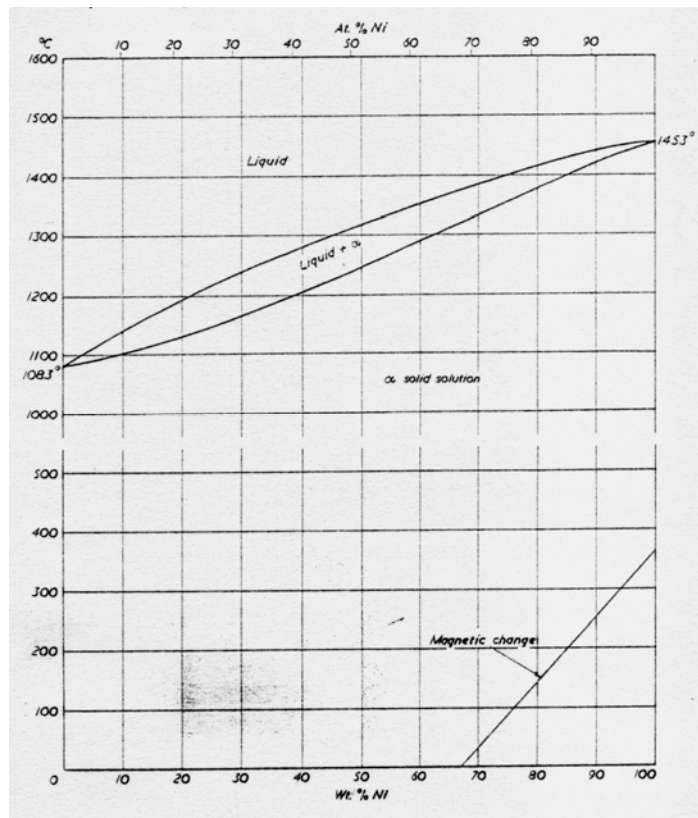
Al - Ag



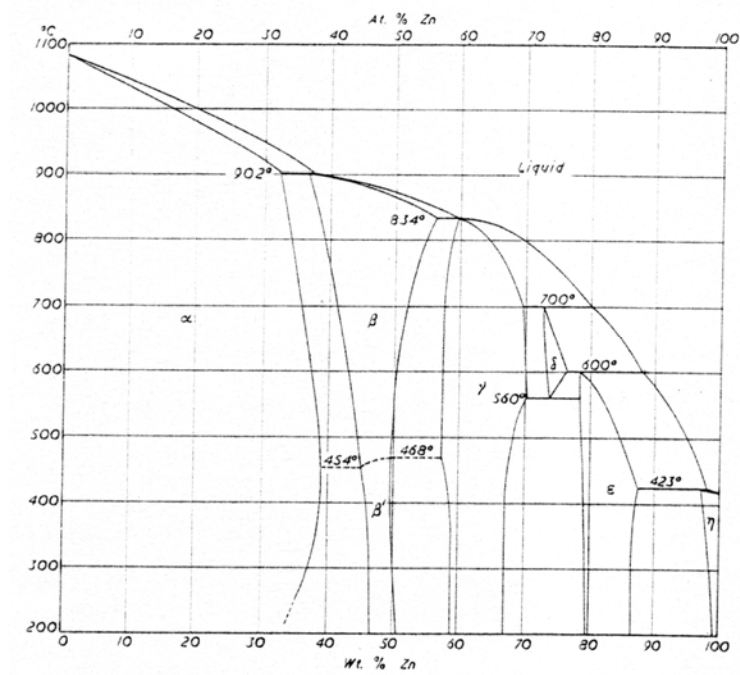
Al - Sn



Cu - Fe



Cu - Ni



Cu - Zn